

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Mgr. Kateřina Skripniková

Detekce krup pomocí dat z meteorologických radarů

Hail detection with weather radar data

DISERTAČNÍ PRÁCE

Školitel: doc. RNDr. Daniela Řezáčová, CSc.

Konzultant: RNDr. Petr Pešice, Ph.D.

Praha 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 9. 9. 2013

Podpis:

Poděkování

Vedoucí práce doc. RNDr. Daniele Řezáčové, CSc. náleží mé poděkování za vedení a cenné rady v průběhu vzniku této práce. Za konzultace při zpracování dat děkuji RNDr. Petrovi Pešice, Ph.D. Za poskytnutá data děkuji Českému hydrometeorologickému ústavu.

Obsah

| | |
|---|----|
| Abstrakt | 3 |
| Úvod..... | 5 |
| 1. Konvekční bouře | 7 |
| 1.1 Typy bouří | 7 |
| 1.2 Kroupotvorné bouře | 10 |
| 2. Mikrofyzika krup | 11 |
| 2.1 Vývoj krup | 11 |
| 2.2 Vlastnosti krup | 13 |
| 3. Krupobití v Česku a ve světě | 18 |
| 3.1 Časový a prostorový rozsah krupobití | 18 |
| 3.2 Časová a prostorová variabilita krupobití..... | 19 |
| 3.3 Vztah krupobití k orografii..... | 24 |
| 3.4 Případové studie krupobití v literatuře | 25 |
| 4. Metody detekce krup z radarových dat | 26 |
| 4.1 Jednoduché metody | 26 |
| 4.2 Využití doplňkových informací | 29 |
| 4.3 Využití dopplerovských informací | 32 |
| 4.4 Využití polarimetrických veličin | 32 |
| 4.5 Využití více vlnových délek | 34 |
| 4.6 Testování a kombinace metod | 35 |
| 4.7 Metody detekce krup ze satelitních dat | 35 |
| 4.8 Detekce škod z krupobití | 36 |
| 5. Použité algoritmy pro detekci krup | 37 |
| 5.1 CAPPI metoda | 37 |
| 5.2 Metoda maximální odrazivosti | 38 |
| 5.3 Metoda podle Waldvogela | 38 |
| 5.4 Metody vycházející z VIL..... | 38 |
| 5.5 NEXRAD algoritmus pro nebezpečné krupobití..... | 39 |
| 6. Vstupní data..... | 41 |
| 6.1 Případy krupobití | 41 |
| 6.2 Radarová data..... | 41 |
| 6.3 Informace z aerologických sondáží..... | 46 |
| 7. Prahové hodnoty pro detekci krup..... | 47 |
| 7.1 Kroupová kritéria | 47 |

| | |
|---|----|
| 8. Testování vybraných metod na datech z Karlsruhe (Německo)..... | 50 |
| 8.1 Používaná data | 50 |
| 8.1.1 Radar IMK | 50 |
| 8.1.2 Události s krupobitím | 53 |
| 8.1.3 Informace z aerologických sondáží..... | 54 |
| 8.2 Krupobitní ohrožení v zájmové oblasti | 55 |
| 8.3 Způsob testování a verifikace metod detekce krup | 56 |
| 8.4 Výsledky verifikace | 58 |
| 8.5 Verifikace ve zmenšené zájmové oblasti..... | 60 |
| 9. Kombinované kritérium..... | 63 |
| 10. Případové studie | 64 |
| 10.1 Krupobití 9. června 2009 | 65 |
| 10.2 Krupobití 15. srpna 2010 | 67 |
| 10.3 Krupobití 24. srpna 2011 | 69 |
| 10.4 Krupobití 2. července 2012..... | 71 |
| 11. Klimatologie vybraných kroupových kritérií..... | 73 |
| 11.1 Plošné rozložení..... | 73 |
| 11.2 Sezonní chod..... | 82 |
| 11.3 Denní chod..... | 83 |
| 11.4 Riziko krupobití v Česku..... | 84 |
| 12. Závěrečné shrnutí a diskuze | 88 |
| Literatura: | 90 |

Abstrakt

| | |
|---------------------------|---|
| Název práce: | Detekce krup pomocí dat z meteorologických radarů |
| Autor: | Kateřina Skripniková |
| Katedra: | Katedra fyzické geografie a geoekologie |
| Školící pracoviště: | Ústav fyziky atmosféry, Akademie věd ČR |
| Vedoucí disertační práce: | Doc. RNDr. Daniela Řezáčová, CSc. |
| E-mail vedoucího: | rez@ufa.cas.cz |
| Konzultant: | RNDr. Petr Pešice, Ph.D. |
| E-mail konzultanta: | pesice@ufa.cas.cz |

Disertační práce se zabývá testováním metod pro detekci krup pomocí dat z meteorologických radarů a využitím výsledných algoritmů pro účely klimatologie krupobití na území Česka. Byla použita data z Dopplerovských radarů pracujících v pásmu C. V první části práce je popsáno testování několika algoritmů zvolených na základě dostupnosti vstupních dat. Pomocí 25 dobře dokumentovaných událostí s krupobitím jsou nalezeny prahové hodnoty, které vytvořily kritéria vhodná pro detekci krup na území Česka. Vzhledem k hodnoceným událostem se práce zabývá detekcí silných krupobití s kroupami o průměru 2 cm a více. Testování bylo provedeno také pro oblast Bádenska-Württemberska, kde byly dostupné podrobnější informace o výskytu silných krupobití. Na základě jednotlivých testovaných kritérií bylo vytvořeno kombinované kritérium (COMBI) pro detekci krup.

Druhá část práce se věnuje použití kroupových kritérií, zejména COMBI kritéria. Ve čtyřech případových studiích silného krupobití je ukázáno fungování COMBI kritéria. Dále je COMBI kritérium aplikováno na radarová data z šestiletého období 2007 až 2012. Byly vyhodnoceny všechny dny vždy pro květen až srpen. Průměrná roční bodová četnost silného krupobití dosahuje na území Česka hodnot do jednoho dne. Na většině území však hodnoty nepřesahují čtvrtinu dne za rok. V sezonním chodu připadá nejvíc událostí se silným krupobitím na červen a denní chod má maximum v odpoledních hodinách mezi 14 a 18 UTC. Plošné rozložení oblastí s nejčastějším výskytem silných krupobití neukazuje na jednoznačnou souvislost s nadmořskou výškou.

Klíčová slova: Kroupy – silné krupobití – meteorologický radar – Česko

Abstract

Title: Hail detection with weather radar data
Author: Kateřina Skripniková
Department: Department of Physical Geography and Geoecology
Workplace: Institute of Atmospheric Physics, Academy of Sciences of the CR
Supervisor: Doc. RNDr. Daniela Řezáčová, CSc.
Supervisor's e-mail: rez@ufa.cas.cz
Consultant: RNDr. Petr Pešice, Ph.D.
Consultant's e-mail: pesice@ufa.cas.cz

The thesis deals with testing of radar-based hail detection methods and their use in hail climatology of Czechia. Data from C-band Doppler radars were used. There is described the testing of the selected algorithms in the first part of the thesis. The algorithms were chosen according to the data availability. On the basis of 25 well documented hail events, suitable threshold values were found to form hail criteria. Because of the hail events considered, the work concentrates on severe hail with diameter from about 2 cm. In addition, available data from Germany (Baden-Württemberg) were included in testing the detection criteria. The best performing criteria were used to form a new combined criterion (COMBI).

The second part of the work applies the hail criteria, in particular the COMBI criterion. The performance of the COMBI criterion is shown in four case studies. Then the COMBI criterion was determined from the radar data of the six years 2007-2012. All the days from the months May to August were evaluated. The point maximum of about one day with severe hail was found for Czechia. For the most of the Czech territory the value was not higher than a quarter of a day in a year. In the seasonal distribution the maximum of hail days belongs to June. And the diurnal distribution showed the maximum of severe hail activity in the afternoon between 14 and 18 UTC. The area distribution of severe hail does not indicate a clear connection with the altitude.

Key words: Hail – severe hailstorms – weather radar – Czechia

Úvod

Ve střední Evropě je silné krupobití řídkým, ale přesto nebezpečným jevem, který může způsobit velké škody na majetku, v extrémních případech i na zdraví obyvatel. Krupobití je prostorově omezený meteorologický jev, který má krátké trvání. Vypadávající kroupy obvykle během zlomku hodiny zasáhnou pás šířky stovek metrů. Síť pozemních stanic není dostatečně hustá, aby výskyt krupobití spolehlivě zaznamenala. Navíc pro operativní detekci krup a varování je problém i s časovou aktualizací a zpožděním při přenosu dat ze stanic. Také vyhodnocení plošného rozložení rizika krupobití na základě záznamů z pozemních stanic je problematické. V omezených oblastech je možné použít hustou síť zachycovačů krup, tzv. „hailpadů“, tedy zařízení pro přímou detekci krup (např. Berthet et al., 2011). V Česku však tato metoda nebyla použita.

Pro detekci krupobití na větší ploše je vhodné použít data z meteorologických radarů. Radary poskytují informace o meteorologických cílech s dobrým časovým a prostorovým rozlišením. Pro standardní meteorologické radary (s jednoduchou polarizací), které se operativně používají v meteorologických službách mnoha zemí, byla popsána řada metod pro detekci krup. Tyto metody používají různé algoritmy pro převod radarové odrazivosti na veličiny vhodné k rozpoznání krup.

Předkládaná disertační práce se zabývá testováním algoritmů pro detekci krup z radarových dat pro použití na území Česka. Cílem první části práce je testování zvolených algoritmů na českých radarových datech a nalezení vhodných prahových hodnot pro detekci krup v Česku. Vzhledem k možnosti práce s radarovými daty a informacemi o krupobití z Německa (Karlsruhe) je v práci zahrnuto i testování algoritmů pro detekci krup v oblasti Bádenska-Württemberska. Na základě testování různých metod je také vytvořeno kombinované kritérium pro detekci krup. Cílem druhé části práce je zpracování klimatologie krupobití na území Česka za použití výsledných kritérií. Vzhledem k dostupným informacím o výskytu krupobití je práce zaměřena na silná krupobití s velkými kroupami, které způsobují rozsáhlé škody. V práci se zabývám zejména průměrnou roční bodovou četností silného krupobití a jejím plošným rozložením v závislosti na orografii.

Práce je členěna do 12 kapitol. První 4 kapitoly jsou teoretické a představují východiska pro vlastní výzkum. První kapitola shrnuje informace o konvekčních bouřích, zvláště o bouřích, ze kterých vypadávají kroupy. Druhá kapitola se věnuje vývoji krup a jejich vlastnostem. Třetí kapitola obsahuje stručnou klimatologii a klimatografii krupobití v Česku a

ve světě. Čtvrtá kapitola popisuje různé metody k používání k detekci krup za použití dat z meteorologických radarů.

Následujících 5 kapitol popisuje testování metod pro detekci krup, hledání vhodných prahových hodnot pro detekci krup na území Česka, testování na datech z Německa a tvorbu kombinovaného kritéria pro detekci krup. Pátá kapitola popisuje algoritmy pro detekci krup zvolené pro testování na českých událostech. Šestá kapitola obsahuje informace o vstupních datech, tedy o použitých událostech s krupobitím v Česku, o radarových datech a jejich výpadech a o datech z aerologických sondáží. Sedmá kapitola popisuje samotný postup při hledání vhodných prahových hodnot pro detekci krup, tedy tvorbu kritérií pro rozpoznání krup v českých radarových datech. Osmá kapitola se věnuje testování metod pro detekci krup v části Bádenska-Württemberska, včetně informací o použitých datech, popisu zájmové oblasti a výsledků testování ve zmenšené oblasti okolí Stuttgartu. Devátá kapitola popisuje tvorbu kombinovaného kritéria pro detekci krup na základě vybraných metod.

V závěrečných dvou kapitolách jsou již kritéria pro detekci krup použita na konkrétních případech a pro delší časový úsek. Desátá kapitola obsahuje čtyři případové studie silného krupobití, na kterých je ilustrováno použití kombinovaného kritéria. Jedenáctá kapitola obsahuje klimatologii krupobití na základě radarových kritérií pro letní částí období 2007-2012. Poslední dvanáctá kapitola shrnuje a diskutuje výsledky práce.

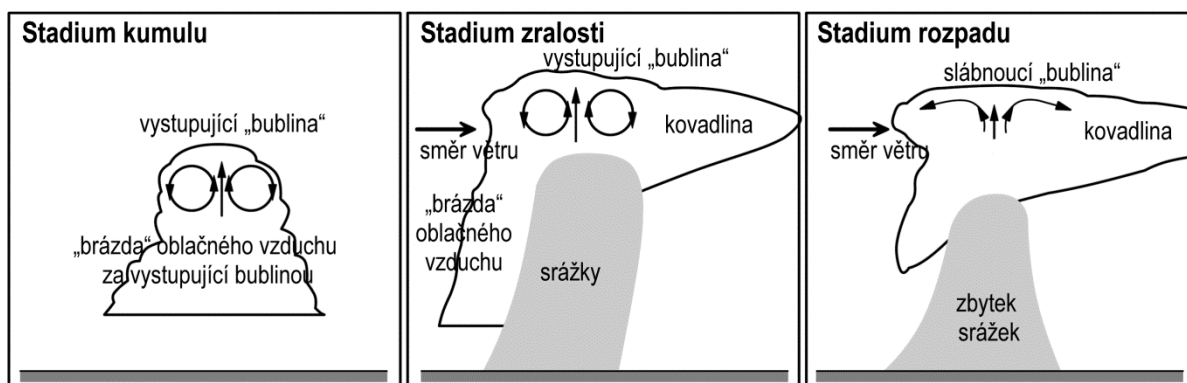
1. Konvekční bouře

Konvekci v meteorologii rozumíme horizontálně omezené vertikální pohyby vzduchu v atmosféře. Rychlejší vzestupné pohyby, způsobené například nerovnoměrným ohříváním povrchu, prouděním přes orografické překážky nebo jejich obtékáním, jsou kompenzovány sestupnými pohyby vzduchu. Konvekce je důležitým mechanismem pro přenos tepla, vlhkosti a hybnosti v atmosféře. Když vzduch vystoupá dostatečně vysoko a dosáhne nasycení vodní párou, tvoří se oblaky, případně i srážky.

Konvekční bouře je obecný termín pro souhrn konvekčních procesů a jevů, které probíhají při vývoji vertikálně mohutných, srážkových konvekčních oblaků druhu Cumulonimbus (Cb). Tyto jevy se mohou projevit jako srážky (přívalový déšť, kroupy), vítr (silný nárazovitý vítr, downburst, tornádo) a elektrická aktivita (blesky). Někdy se setkáváme s termínem silná či nebezpečná konvekční bouře (z angl. severe convective storm). Meteorologická služba USA užívá kritéria, která vymezují pojem „Severe Thunderstorm“ a jsou dána výskytem (a) tornáda, (b) nárazů větru větších nebo rovných 50 uzlům (25 m.s^{-1}) případně (c) krup o průměru nejméně 1 palec (2,5 cm) (definice podle NOAA Glossary, <http://w1.weather.gov/glossary/>). Celosvětově ani v Evropě nebyla stanovena žádná kritéria, která by definovala hranici mezi slabými a silnými bouřemi. Výrazná silná nebo nebezpečná bouře je tedy pouze kvalitativní charakteristika bez podkladové kvantitativní definice (Řezáčová et al., 2007).

1.1 Typy bouří

Konvekční bouře mohou nabývat mnoha různých forem, od izolované bouře, tvořené jediným vzestupným proudem (konvekční buňkou), až po konvekční systém (mesoscale convective komplex), tvořený souborem multicelel a supercelel. Bouře se obecně rozlišují na tři základní typy: jednoduchá cela, multicela a supercela. Podmínkami, které určují typ bouře, jsou především vertikální stříh větru (změna vektoru rychlosti větru s výškou) a instabilita prostředí. Charakteristikou instability vzduchové hmoty je například CAPE (= convective available potential energy). CAPE je integrální míra instability vrstvy ohraničené hladinou volné konvekce a hladinou nulového vztlaču. Kunz (2007) například udává hodnotu CAPE = 730 J/kg jako práh pro výskyt silných bouří a CAPE = 1470 J/kg pro výskyt krupobití v jihozápadním Německu.



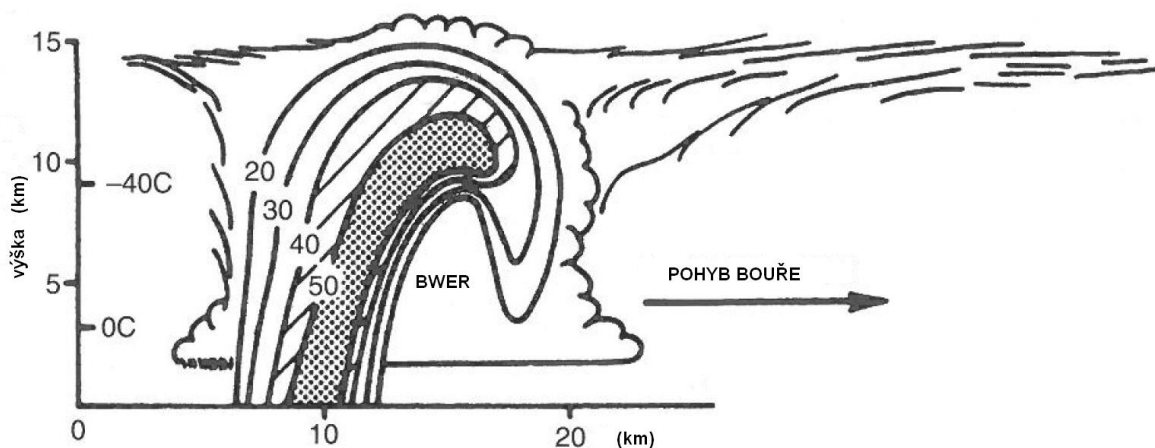
Obr. 1.1 Schematické znázornění vývojových stadií jednoduché cely podle C. A. Doswella. Převzato z (Řezáčová et al., 2007).

Ve střední Evropě se často vyskytují bouře ve formě jednoduché cely (Puskeiler, 2009). Konvekční událost typu jednoduché cely vzniká při slabém vertikálním střihu (do 10 m/s) a nízkých hodnotách CAPE a její životnost je přibližně půl hodiny. V životním cyklu jednoduché cely lze rozlišit tři vývojová stadia: (1) stadium kumulu, při kterém převládá vzestupný proud, (2) stadium zralosti, kdy jsou projevy konvekční buňky nejsilnější a existuje současně vzestupný i sestupný proud, a (3) stadium rozpadu, při kterém převažuje sestupný proud a oblak se rozpadá (obr. 1.1). Jednoduchá cely se jeví jako mohutný a hustý oblak velkého vertikálního rozsahu a v našich zeměpisných šířkách vždy obsahuje ledové částice. Vrchní část oblaku se často rozšiřuje do podoby kovadliny. Jeho základní struktura je tvořena vzestupným proudem a později proudem sestupným. Vzestupný proud se může skládat z více proudů a jeho výstupná rychlost se mění s časem. Při zesilování může vzestupný proud překročit nulovou izotermu. Vzniknou tak podmínky vhodné pro růst ledových částic. Větší částice pak tvoří srážky, menší částice jsou unášeny nahoru a do strany a tvoří kovadlinu.

Při středně velkém vertikálním střihu (10-20 m/s) a vyšších hodnotách CAPE vznikají bouře typu multicela. Multicela se skládá z více buněk v různém stadiu vývoje. Jednotlivé buňky mají stejnou životnost jako jednoduchá cely, multicela jako celek však může přetrvávat několik hodin. Mladé buňky se vyznačují dynamickým vzestupným proudem a rychlým růstem hydrometeorů. Buňky ve stadiu zralosti obsahují kromě vzestupného proudu i proud sestupný a s ním související vypadávání srážek. Rozpadávající se buňky už mají pouze sestupný proud a vypadávání srážek doznívá. Nové buňky se formují před vedoucím okrajem bouře podél gust-fronty, kde výtok chladného vzduchu způsobuje výstup teplejšího vzduchu od povrchu. Krupky padající z rostoucích mladých buněk mohou být vtaženy do centra

bouře, kde se dostanou do hlavního vzestupného proudu bouře a mohou znovu stoupat. Krupky se v hlavním vzestupném proudu mohou dostat do oblastí s velkým obsahem kapalné vody a narůst ve velké kroupy. Kroupy pak v hlavním sestupném proudu rychle vypadávají k zemi. Uvedený proces způsobuje v radarové struktuře typický výběžek odrazivosti a pod ním oblast se slabou odrazivostí (WER – weak echo region) (Meischner et al., 2004). Velikost a směr rychlosti multicely je součtem vektoru rychlosti jednotlivé buňky a vektoru šíření – vývoje nových buněk.

Za vhodných podmínek (vysoké hodnoty CAPE v kombinaci se stříhem větru) vzniká vzácnější a silnější typ konvekční bouře – supercela. Tyto bouře mohou produkovat silný déšť, nebezpečné kroupy a ničivá tornáda. Supercela má velikost srovnatelnou s multicelou, ale struktura a projevy jsou řízeny cirkulací, podobnou uspořádání v jedné buňce. Existuje zde pouze jediný obří pár vzestupného a sestupného proudu. Životnost supercely je od 2 do 6 hodin. Extrémně silný vzestupný proud, jehož rychlost může překročit i 40 m/s, podporuje růst velkých krup. Základní vlastností supercely je vznik mezocyklony ve středních hladinách atmosféry. Oblast vzestupného proudu v supercele rotuje. Na obr. 1.2 je znázorněn vertikální průřez supercelou, jak ji zachycuje radar. Typickým rysem supercelární bouře je oblast bez radarového echa (BWER – bounded weak echo region). Silný vzestupný proud zde nedává dostatek času pro zformování velkých částic.



Obr. 1.2 Schematický průřez radarovou strukturou supercelární bouře v rovině pohybu. Úrovně odrazivosti jsou uvedeny v dBZ. Převíslá oblast označovaná jako zárodkový závěs (embryo curtain) obsahuje částice milimetrových velikostí, z nichž některé jsou vtahovány do hlavního vzestupného proudu a narůstají ve velké kroupy. Upraveno podle Cotton a Pielke (2008), původně převzato z Chisholm a Renick (1972).

1.2 Kroupotvorné bouře

Mezi bouřemi, ze kterých vypadávají kroupy, a ostatními není ostrá hranice. Téměř všechny silné konvekční bouře pravděpodobně vytvářejí ve výšce nějaké kroupy, ne vždy však kroupy dopadají k zemi (Knight a Knight, 2001). Rozdíl tedy je ve velikosti a množství krup produkovaných jednotlivými bouřemi.

Podmínkou vzniku krup je silný vzestupný proud, který umožní vznik velkých krup. Velikost vypadávajících krup tak může být hrubou aproximací síly vzestupného proudu. Ale rychlosti nad 40 m/s jsou obvykle příliš vysoké, aby v nich kroupy mohly dostatečně narůst. Významné krupobití tak produkují spíše bouře s rozsáhlými oblastmi vzestupných proudů středních rychlostí (20-40 m/s), než bouře se silným kompaktním vzestupným proudem (Nelson, 1987). Dále je nutné, aby se do oblasti s přechlazenou vodou dostaly zárodky krup, jejichž narůstání je ovlivněno trajektorií pohybu těchto narůstajících krup. O složitém časoprostorovém rozložení vlastností oblaku, které určuje vývoj krup, můžeme získávat informace pouze nepřímo. Studie sledující vývoj krup se zaměřují na řešení dvou základních otázek: (1) Jaká je organizace bouře, která může zajistit vznik kroupových zárodků a dopravit je do míst, kde mohou dále růst a (2) jaké jsou trajektorie krup v oblaku, které umožňují růst krup do značné velikosti? (Řezáčová et al., 2007). Přehled vývoje teorií o vzniku a růstu krup týkající se obou otázek shrnují C. A. Knight a N. C. Knight (2001) následovně.

Pravděpodobným zdrojem kroupových zárodků jsou v případě multicelárních bouří menší cely nacházející se obvykle ve směru proti větru (relativně k bouři) od hlavního vzestupného proudu. Takový zdroj zárodků může být velice blízko hlavnímu, tedy nejsilnějšímu, vzestupnému proudu nebo se může nacházet ve vzdálenosti 10 – 20 km i více. Další možná oblast vzniku zárodků je na okraji hlavního vzestupného proudu. Zárodky také vznikají odstřikováním z mokřých krup. Takové zárodky by se měly nazývat sekundární, protože pro jejich vznik je již nutná existence krup v oblaku, ostatní zárodky jsou primární (Knight a Knight, 2001). V bouři mohou fungovat tyto zdroje zárodků současně. Zárodky pak vstupují do silného vzestupného proudu a dále narůstají.

V bouřích produkujících krupobití spolupůsobí dynamika bouře a mikrofyzikální procesy. Pro zjednodušení jsou tyto dva aspekty obvykle oddělovány a je zajímavé, že dva důležité cíle výzkumů týkajících se krupobití, tedy predikce krupobití a potlačování krupobití, mají odlišný základ. Předpovídání krupobití je založeno na predikci takových vlastností bouře, jako jsou vzestupné proudy a v případě velmi krátkodobé předpovědi na parametrech

radarového odrazu. Zatímco potlačování krup je založeno na mikrofyzikálním zásahu, jakým je umělá infekce oblaků (Knight a Knight, 2001).

2. Mikrofyzika krup

2.1 Vývoj krup

Kroupy se vyvíjejí v konvekčních oblacích zasahujících vysoko nad hladinu mrznutí, které obsahují dostatečnou zásobu přechlazené vody. Pro vznik krup je důležitý silný vzestupný proud, který kroupám zajišťuje dostatečnou dobu setrvání v oblaku, aby mohly narůst do příslušné velikosti. Další podmínkou vzniku krup je vytvoření zárodků, které pak dále narůstají. Hlavním růstovým mechanismem kroupy je zachycování přechlazených vodních kapek. Depozice vodní páry přispívá k narůstání kroupy zcela zanedbatelně, protože rychlost růstu depozicí je malá a kroupa by tak nestihla narůst do významné velikosti v reálném čase. Při svém růstu kroupy vzhledem k zemskému povrchu stoupají či klesají v závislosti na rychlosti vzestupného proudu. Uvažují se i trajektorie spirálového tvaru. V různých oblastech bouře při různých fázích narůstání se liší způsob růstu podle aktuálních podmínek.

Prvním stadiem vzniku kroupy je vývoj ledového zárodku. Ten musí být dostatečně velký, aby mohl dále sbírat kapky přechlazené vody. Zárodkem je buď přímo velká zmrzlá kapka vzniklá koalescencí. Nebo zárodek vzniká tak, že se vytvoří oblačná kapka, zmrzne, naroste ve sněhový krystal a začne sbírat přechlazené vodní kapky, čímž vznikne krupka tvořící kroupový zárodek. Oba tyto procesy vedoucí ke vzniku zárodku trvají 20 až 30 minut. Vznik zárodku musí probíhat v jiných dynamických podmínkách, než následný růst kroupy. Silný vzestupný proud nutný pro vývoj kroupy by byl příliš velký pro zárodek a vynesl by ho rychle do kovářiny bouře. Za dvacet minut by formující se zárodek ve vzestupném proudu o rychlosti 15 – 20 m/s potřebném pro vývoj krup vystoupal kolem dvaceti kilometrů vzhledem k zemskému povrchu. Konkrétně zárodek s pádovou rychlostí 1 m/s by v takovém vzestupném proudu stoupal průměrnou rychlostí 14-19 m/s a vystoupal by tak o 18 - 22,8 km.

Kroupy vznikají ze zárodků dalším narůstáním nad hladinou mrznutí, zejména zachycováním přechlazených vodních kapek. Mrznutí vody zachycené kroupou je spojeno s uvolňováním latentního tepla, které ohřívá kroupu a může ovlivnit průběh mrznutí.

Okamžitě namrzá pouze část zachycené přechlazené vody. Při teplotě -20°C je to $\frac{1}{4}$ (Knight a Knight, 2005). Zbývající voda (pokud neodstříkne z povrchu kroupy) namrzá pomaleji a předává latentní teplo mrznutí kroupě a do bezprostředního okolí. Pokud kroupa sbírá kapky tak rychle, že všechna zachycená voda nemůže okamžitě namrznout, tak se může kapalná voda stát součástí kroupy a teplota narůstající kroupy se přibližuje 0°C . Pokud je ale zachycování vody pomalé, blíží se teplota kroupy teplotě okolní části oblaku. Rovnováha mezi rychlostí narůstání a přenosem tepla, která je určující pro růst krup, je primárně funkcí pádové rychlosti kroupy, teploty oblaku a obsahu kapalné vody v oblaku. Při takzvaném suchém růstu zachycené kapky okamžitě namrzají a teplota povrchu kroupy je pod 0°C . Vzniká led s množstvím zachycených vzduchových bublin. V odraženém světle se tyto vrstvy jeví jako bílé. Při studiu tenkých řezů krup jsou tyto části v procházejícím světle naopak tmavé. Druhým růstovým režimem je takzvaný mokrý/vlhký růst. Při něm je rychlost zachycování vody větší než rychlost transportu tepla. Povrch kroupy se obaluje kapalnou vodou, která až poté mrzne. Přirůstá tak čirý led s malým množstvím bublin. Podle laboratorních simulací růstu může být množství kapalné vody zataženo dovnitř kroupy za vzniku tzv. houbovitého ledu. Pokud taková houbovitá kroupa následně zcela zmrzne, vytvoří se jasně odlišitelné vzduchové bubliny. Při studiu krup z mnoha krupobití byl potvrzen výskyt houbovitého ledu i v přírodě, ovšem vzácně (Knight a Knight, 2005).

Odhad trajektorie krup v oblaku od vzniku zárodku kroupy až po její vypadnutí z oblaku je jednou z nejsložitějších otázek (Řezáčová et al., 2007). Trajektorie jsou studovány pomocí numerických modelů, a to tak, že se zárodky různých velikostí umísťují do různých pozic v modelovém oblaku. Oblast, kde probíhá většina růstu kroupy, je v rozmezí teplot -10°C až -25°C , což odpovídá vertikálnímu rozsahu cca 2,5 km. Vrstevnatá struktura krup byla dříve vysvětlována opakovaným pohybem krup v oblaku směrem nahoru a dolů. Vycházelo se z úvahy, že kroupy mohou zachycovat kapalnou vodu pouze pod hladinou mrznutí a musí vystoupat vysoko nad tuto hladinu, aby voda zmrzla. Důvodem vzniku vrstev je proměnlivý obsah přechlazené vody a proměnlivá teplota oblaku. Trajektorie, podél kterých se kroupy vyvíjejí, nejsou složité. Jde většinou o jednoduché dráhy s jedním vzestupem a jedním sestupem, které vedou skrz nebo kolem hlavního vzestupného proudu. V každé bouři však existuje celá množina možných trajektorií. Obecně lze říci, že tato množina je tím větší, čím rozlehlejší je bouře, čím více je k dispozici dat pro analýzu a čím je složitější pole proudění

v bouři (Knight a Knight, 2001). Nepříliš často se objevují i opakované vzestupy a sestupy. Potom však nastává otázka jakou část dráhy připsat ještě zárodku a jakou již kroupě.

2.2 Vlastnosti krup

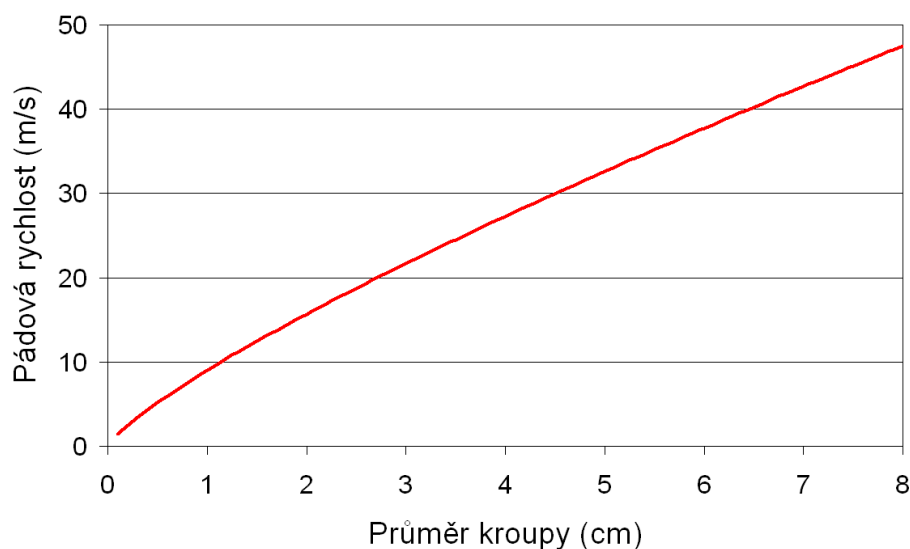
Kroupy jsou „kulové, kuželovité nebo i nepravidelné kusy ledu o průměru větším než 5 mm. Mohou mít v průřezu několik zřetelných vrstev průzračného a průsvitného ledu“ (Meteorologický slovník, 1993). V centru kroupy bývá zřetelně rozlišitelný zárodek, na kterém kroupa narůstá. Vznik zárodku se liší od pozdějšího narůstání kroupy a dochází k němu různými způsoby (viz kap. 2.1). Rozdílnými podmínkami v oblaku tak vznikají odlišné vrstvy kroupy tvořící její charakteristickou strukturu.

Většina krup dopadajících na zemský povrch má charakteristický rozměr několika centimetrů. Kroupy každoročně zaznamenané na území ČR mají zpravidla průměr kolem 1 až 2 cm. Lze však dokumentovat i lokální krupobití, při nichž vypadávají kroupy o charakteristickém průměru nad 4 cm (Řezáčová et al., 2007). Výjimečně se však vyskytují i kroupy obřích rozměrů. V historických dokumentech lze nalézt více i méně důvěryhodné popisy velkých krup. Současné popisy obřích krup jsou již dobře dokumentovány a největší velikost jejich obvodu přesahuje 40 cm. Velké kroupy mají velmi nesymetrický a členitý tvar s rampouchovitými laloky či výběžky (z angl. „icicle lobes“). Při jejich srovnávání je tedy důležité, z jakého hlediska jsou popsány. Například 3. září 1970 byla v Coffeyville (Kansas, USA) zaznamenána kroupa o maximálním obvodu 44 cm a hmotnosti 766 g (Roos, 1972). Objem této kroupy odpovídá objemu koule o poloměru kolem 7 cm. Při krupobití v městě Aurora (Nebraska, USA) 22. června 2003 byla zaznamenána kroupa největší co do průměru a délky, zdaleka však nebyla největší, uvažuje-li se váha či objem (Knight a Knight, 2005). Největší průměr této kroupy se blížil 18 cm (7 palců), ale její váha byla pouze kolem 500 g. Obří kroupy mohou být zajímavé pro odhad maximální rychlosti vzestupného proudu v oblaku, jinak jsou však spíše kuriozitou. Kroupy při růstu soupeří o oblačnou vodu, koncentrace krup proto klesá s jejich velikostí a extrémně velké kroupy jsou tak velmi řídké. Mnohem významnější jsou kroupy středních velikostí, které způsobují velké škody na úrodě i majetku.

Co se týče velikostního rozložení krup a krvinek, tak koncentrace těchto ledových částic rychle klesají s růstem jejich velikosti. Krupky o průměru 0,5 až 5 mm se vyskytují

v koncentracích mezi 10^3 až 1 m^{-3} , malé kroupy s průměrem mezi 0,5 a 2,5 cm v koncentracích 1 až 10^{-2} m^{-3} a velké kroupy s průměrem 2,5 až 8 cm v koncentracích pohybujících se od 10^{-6} do 10^{-2} m^{-3} (Pruppacher a Klet, 1980).

Kroupy mohou nabývat různých tvarů, vzhledu a povrchové struktury. Tvar kroupy by mohl být vlastností vhodnou k odvození růstových podmínek pro kroupy v oblaku. Tvar totiž ovlivňuje způsob pádu, účinnost zachycování, výměnu tepla a tudíž rychlost růstu. Kroupy mají kulový, elipsovité nebo kuželovité tvar často s laloky, pahrbky (z angl. „knobs“), nebo jinými výrůstky na povrchu. Malé kroupy jsou většinou symetrické, nejčastěji mají přibližně kulový tvar a někdy jsou na jednom konci zašpičatělé. Vyskytuje se i zploštělý sféroidní tvar krup, který svědčí o jejich převažující orientaci při pádu (Řezáčová et al., 2007). Velké kroupy mají více nepravidelných tvarů s výrůstky a laloky. Obvykle jsou kroupy o průměru 5 až 10 mm zhruba kulové či kónické, větší kroupy jsou elipsovité až kónické (10 až 20 mm); elipsovité s laloky či pahrbky a rýhami podél nejkratší osy (10 až 50 mm); a zhruba kulové či nepravidelné s malými nebo velkými výrůstky (40 až 100 mm). Byly pozorovány i další tvary jako disky, krystaly s plochými povrchy a části koule (z angl. „slices of spheres“) (Kessler, 1992).



Obr. 2.1 Pádová rychlost kroupy v závislosti na jejím ekvivalentním průměru. Podle vztahu (2.1).

Významnou vlastností krup jsou vysoké pádové rychlosti, způsobené jejich velkou hmotností. Pádové rychlosti jsou důležité kvůli ničivému potenciálu krup a také jako

indikátor rychlosti vzestupného proudu v bouři, která takové kroupy vytváří. Často užívaným vztahem pro pádové rychlosti krupek a krup je

$$u_{krup} \approx 9D^{0,8}, \quad (2.1)$$

kde D je střední průměr krup. Vztah platí při tlaku 800 hPa a teplotě 0°C a pro střední průměr krup v rozmezí $0,1 \text{ cm} \leq D \leq 8 \text{ cm}$ (Pruppacher a Klett, 1997). Velké kroupy mohou dosahovat krajní pádové rychlosti až 45 m/s. Uvnitř konvekční bouře, v níž se kroupy tvoří a rostou, musí tedy existovat srovnatelné vzestupné rychlosti. Způsob pádu krup z přirozených oblaků je prakticky nemožné pozorovat. Bylo ale provedeno několik studií, při nichž se radarem sledoval pád modelů krup vypouštěných ve volné atmosféře. Studie ukazují, že kroupy i krupky během pádu kmitají a převalují se. Tyto nepravidelnosti jsou vyvolány tvarem a často nesymetrickým rozložením hmotnosti krup na jedné straně, přispívají však i k nerovnoměrnému zachycování přechlazené vody a mrznutí na povrchu kroupy na straně druhé (Řezáčová et al., 2007). Knight a Knight (1970) zjistili, že rychlé symetrické převalování je při růstu krup pravidlem, ale způsob převalování je velmi citlivý na podmínky v oblaku. Kroupy, které jsou velmi podobné, tak mohou padat velmi odlišným způsobem.

Kroupy dopadající na zemský povrch nejsou vždy tvořeny homogenním tvrdým ledem. Některé jsou méně odolné díky dutinám se vzduchem či nezamrzlou vodou. Vyskytují se i kroupy velmi měkké, tzv. houbovitě struktury. Tvrdost kroupy je dána způsobem vzniku a dalším působením podmínek, za nichž se kroupa vyvíjí. Přestože se houbovitý růst v laboratorních podmínkách zdá celkem obvyklý, jeho výskyt v přírodě je pravděpodobně velmi řídký. Kroupy s houbovitou strukturou působí méně závažné škody, než kroupy tvrdé. Zajímavé by tak mohlo být, jak uměle způsobit, aby kroupy byly houbovitě a neohrožovaly tak úrodu a majetek (Kessler, 1992). Jednou z metod používaných pro potlačování krupobití je generování výbuchů. Tlaková vlna by měla způsobit kolaps vzduchových bublin v kroupách a tím vytvořit měkké houbovitě kroupy. Wieringa a Holleman (2006) ale po shrnutí zkušeností s děly proti krupobití a poznatků o nich usuzují, že jejich používání je plýtváním peněz a času. Také podle Světové meteorologické organizace neexistuje ani odborný základ, ani věrohodná hypotéza, které by podpořily tyto aktivity (Řezáčová et al., 2007).

Používají se však jiné metody pro potlačení krupobití, které mají základ v koncepčních modelech konvekčních bouří, v nichž může ke krupobití dojít. Tyto koncepční modely jsou základem pro operativní programy boje proti krupobití. Technologie zásahů boje proti krupobití spočívá v umělé infekci konvekčních oblaků umělými ledovými jádry. Nejobvyklejší

infekční látkou jsou částice obsahující AgI, které jsou do oblaku dopravovány různým způsobem. Používají se pozemní generátory, rakety dopravující infekční látku ze země do vyšších oblačných hladin nebo letadla, na nichž jsou připevněny hořáky s infekční látkou (Řezáčová et al., 2007).

Cotton a Pielke (2008) popisují tři základní koncepce pro potlačení krupobití. První je koncepce vyžadující zmrznutí všech přechlazených oblačných kapek v horní části oblaku (angl. „The glaciation concept“). Tento přístup vyžaduje dodání tak velkého množství ledových částic do oblaku, aby při narůstání spotřebovaly veškerou dostupnou přechlazenou vodu. Vzhledem k obrovskému množství materiálu, který by bylo potřeba dodat do vzestupného proudu, je tento postup v podstatě neproveditelný. Koncepce je považována za nevhodnou také proto, že může snižovat množství deště. Protože je mnoho oblastí ohrožovaných silným krupobitím zároveň semiaridní, mohl by úbytek deště způsobit větší škody než samotné krupobití.

Druhou koncepcí pro potlačení krupobití je princip užitečné soutěže kroupových zárodků („The embryo competition concept“). Principem je snaha o zvýšení koncentrace kroupových zárodků v oblastech, kde dochází k největšímu narůstání krup. Mělo by tak dojít k tomu, že zárodky soupeří o dostupnou přechlazenou vodu, a tedy vznikne spíše více malých krup či krulek, než aby vznikly potenciálně nebezpečné velké kroupy. Přímé dodávání kroupových zárodků však není ekonomicky únosné. Proto se používají techniky, které mají podpořit přirozenou tvorbu kroupových zárodků v oblaku.

Třetí koncepcí pro potlačení krupobití je předčasný déšť a případně snížení trajektorie srážkových částic infekcí soli („Early rainout and/or trajectory lowering liquid water depletion by salt seeding). Principem předčasného deště je vyvolání ledových srážek v nižších částech oblaku v oblasti tvorby zárodků. Předčasně vyvolané srážky mohou vypadávat do oblasti, odkud proudí vlhký vzduch do oblaku a tomuto proudění bránit. To by pak způsobilo snížení množství přechlazené vody v bouři. Vyvolání tvorby ledových částic v nižších částech oblaku může snížit množství přechlazené vody dostupné pro tvorbu krup ve vyšších částech oblaku. Technika snížení trajektorie srážkových částic spočívá v infikování základny oblaku částicemi soli nebo jiným hygroskopickým materiálem, čímž se spustí tvorba srážek v nižších částech oblaku. Tímto způsobem je spotřebována část kapalné vody, a tím limitován růst krup.

Přestože operativní zásahy pro potlačení krupobití probíhají v řadě zemí, včetně evropských, nebyla zatím vědecky průkazně potvrzena ani vyvrácena účinnost těchto technologií.

Další popisované charakteristiky krup jsou typy jejich zárodků a obsah příměsí. Zárodek kroupy, tedy viditelně odlišná vnitřní část kroupy, nemá jednoznačnou definici. Protože jsou kroupy definovány od velikosti 5 mm, můžeme částici o velikosti 5 mm považovat za zárodek. Velké kroupy s průměrem přes 2,5 cm ale mají často růstové centrum s průměrem od 5 mm do 1 cm (Gokhale, 1975). Jednoduše lze zárodky rozdělit do čtyř kategorií, a to: zmrzlá kapka, kuželovitá krupka, kulový porézní zárodek a ostatní (Knight a Knight, 2005). Zárodky typu kuželovité krupky mají část vzniklou volným namrzáním – ozrněním následovanou hustším namrzáním během pádu s přibližně stálou orientací. Původní ledová částice, na které namrzání začalo, bývá pravděpodobně malá zmrzlá kapka nebo sněhová částice. Kulový porézní zárodek může mít původ ve sněhovém agregátu, nebo krupce, která narůstala během převalování, nebo se může jednat o částečně roztátou a znovu zmrzlou krupku.

Studie souborů krup z význačných bouří odhalují různé souvislosti. Pozoruhodné je zjištění, že kroupy z jedné bouře často mají různé typy zárodků. V severovýchodním Coloradu bylo několikaletým sledováním krup a klasifikováním jejich zárodků zjištěno, že převažují zárodky typu krupky. To podpořilo závěr, že hlavním mechanismem formování srážek v této oblasti jsou ledové procesy (Knight, 1981). Některé kroupy však měly zárodek typu zmrzlé kapky. Oblaky v severovýchodním Coloradu mají poměrně chladné základny, takže zárodky se většinou pohybují nad hranicí mrznutí a kroupy pak mají zárodek typu krupky. Málokdy se zárodek během svého vývoje dostane do oblasti s nadnulovou teplotou, kde některé krupky roztají a kroupy pak mají různé typy zárodků. S touto teorií souhlasí studie z jiných oblastí, kde byla pozorována převaha zárodků typu zmrzlé kapky v kroupách v souvislosti s teplejší základnou oblaků. Zárodek typu zmrzlé kapky ale může vzniknout i primární koalescencí a následným zmrznutím, ne pouze roztátím a zmrznutím krupky. Dále byl pozorován vztah mezi velikostí krup a typem zárodku, konkrétně vyšší zastoupení zárodku typu zmrzlé kapky u větších krup. S tímto zjištěním souhlasí i popis devatenácti velkých krup ve městě Aurora (Knight a Knight, 2001), z nichž žádná neměla zárodek typu konické krupky.

Kroupy mohou obsahovat různé příměsi buď přímo jako kondenzační či ledová jádra, nebo je zachycen materiál z atmosféry z vnitřku oblaku nebo z podoblačné vrstvy.

Porovnáním příměsí obsažených v kroupách a v dešti bylo odvozeno, že hlavním mechanismem odstranění příměsí je u konvekčních oblaků vypršení (rainout), tedy zabudování příměsí přímo do srážkových částic, spíše než podoblačné vymývání (washout). Díky velkému množství vzduchu, který proudí oblakem, lze konvekční bouře považovat za účinný mechanismus k odstranění atmosférického znečištění (Kessler, 1992).

3. Krupobití v Česku a ve světě

Krupobití je hydrometeor tvořený kroupami, které vypadávají z oblaku druhu kumulonimbus. Trvá zpravidla jen několik minut, výjimečně i půl hodiny, a zasahuje obvykle jen omezenou oblast. Vyskytuje se převážně v teplé roční době, a to v odpoledních hodinách (Meteorologický slovník, 1993).

3.1 Časový a prostorový rozsah krupobití

Krupobití má charakter časově i prostorově omezené události. Oblast zasažená kroupami má plochu průměrně jen několik desítek kilometrů čtverečních. Plochu souvisle zasaženou kroupami lze označit jako kroupový pruh na základě anglického termínu „hailstreak“ a jedná se o oblast ovlivněnou jednou bouřkovou buňkou. Obalová plocha všech kroupových pruhů z jedné bouře je v angličtině označována „hailswath“ (česky tedy lze označit jako kroupový pás) a často zasahuje plochu sto kilometrů dlouhou a deset kilometrů širokou.

Rozsahem krupobití se zabývali například v kontinentální části Chorvatska, kde jsou k dispozici informace ze sítě „hailpadů“. Krupobití tu trvá průměrně 4,2 minuty a při průměrné rychlosti bouřkové buňky 27 km/h je hypotetická délka pruhu zasaženého krupobitím 1890 metrů (Počakal et al., 2009). Při poměru delší a kratší osy pruhu krupobití 5 ku 1 (Changnon, 1970) je průměrná plocha oblasti poškozené krupobitím 0,7 km².

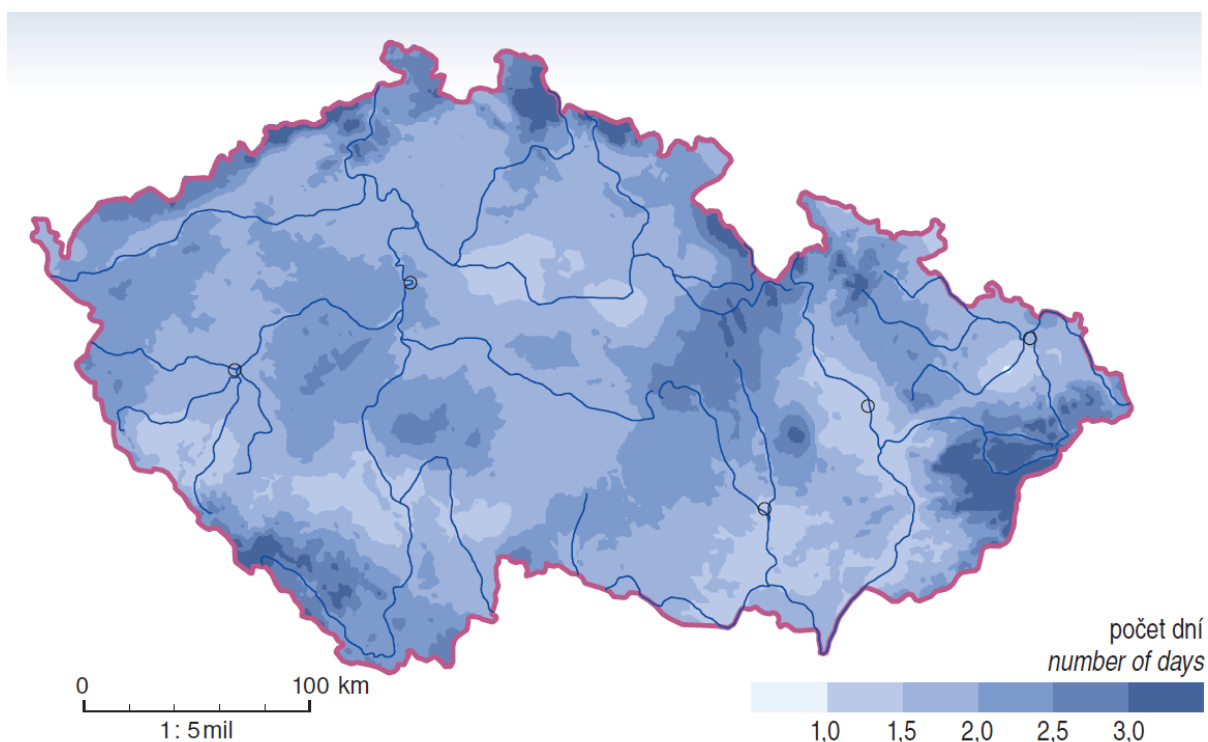
V Británii se zabývali velikostí kroupových pásů a zjistili, že silná krupobití zasahují obvykle pás dlouhý 25 km či více, výjimečně i přes 200 km a široký i 10 km či více (Webb et al., 2001).

Prostorovou omezenost krupobití potvrzuje Mikeladzová (2009), když se zabývá shodou v pozorování krupobití na pěti stanicích v Brně v období 1991-2007. I v případech kdy

měřilo všech pět stanic, se v Brně nevyskytlo krupobití, které by bylo zaznamenáno na všech těchto stanicích a dokonce ani na čtyřech z pěti stanic.

3.2 Časová a prostorová variabilita krupobití

Výskytu krupobití na území Česka je věnována pozornost v Atlasu podnebí Česka (2007). Na základě pozorování na meteorologických stanicích v období 1981 až 2000 je sestavena mapa znázorňující průměrný roční počet dní s krupobitím (obr. 3.1).

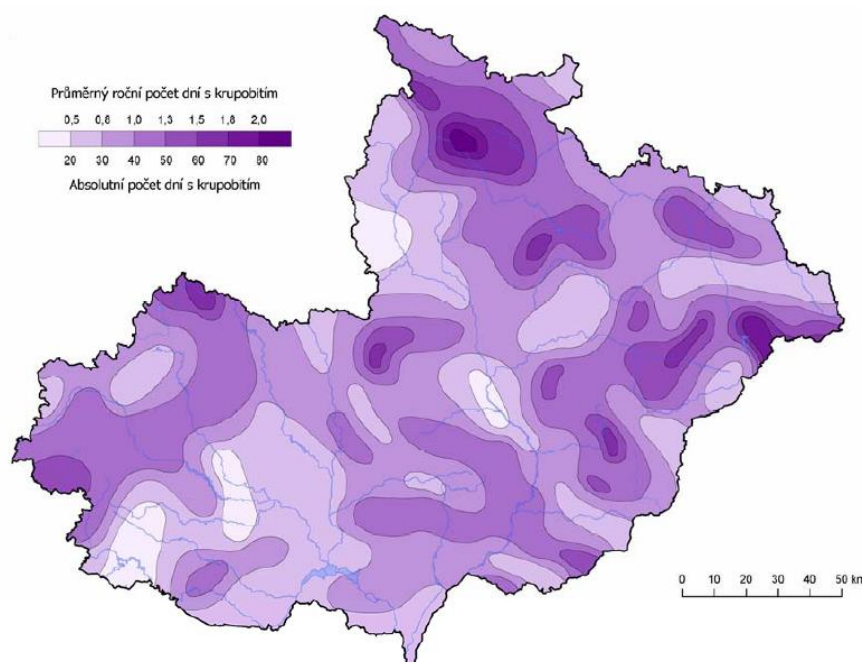


Obr. 3.1 Průměrný roční počet dní s kroupami 1981-2000. Převzato z Atlasu podnebí Česka (2007).

Obvyklý roční počet dní s kroupami na území Česka za období 1981 až 2000 je znázorněn mezi hodnotami 1 a 2,5. V Atlasu podnebí Česka (2007) jsou zpracovány také průměrné měsíční počty dní s kroupami ve formě kartodiagramů pro 33 meteorologických stanic za období 1961-2000. Z uvedených 33 stanic tu dosahuje nejvyšší průměrný roční počet dní s krupobitím Praděd (5,4 dne) a nejnižší Kralovice (0,6 dne).

Mapu (obr. 3.2) geografického rozložení četnosti výskytu krupobití na Moravě a ve Slezsku uvádí Chromá (2005). Tato mapa je podle autorky jistým typem mapy krupobitního rizika, i když nezohledňuje intenzitu krupobití a způsobené škody. Pro vytvoření mapy autorka použila údaje o krupobití z meteorologických stanic z databáze ČHMÚ, k nimž přidala

vlastní excerptce z pozorovacích výkazů. Celkem použila data ze 174 stanic. Mapy s průměrným ročním počtem dní s kroupami (obr. 3.1 a 3.2) se často shodují ve struktuře rozložení hodnot, ale v mapě (obr. 3.1) je viditelně zvýrazněna orografie zejména v oblasti Beskyd. Mapa v Atlasu podnebí Česka (obr. 3.1) také udává vyšší hodnoty. Nejvyšší tak jsou hodnoty nad 3 dny s kroupami za rok, zatímco v mapě od Chromé (obr. 3.2) jsou nejvyšší hodnoty kolem 2 dní s kroupami za rok. Chromá (2005) také uvádí zjištění, že růstu teplot vzduchu v České republice (1961-1998) odpovídá pokles četnosti výskytu krupobití ve východní části republiky (statisticky významný lineární trend 2,3 dne/ 10let).

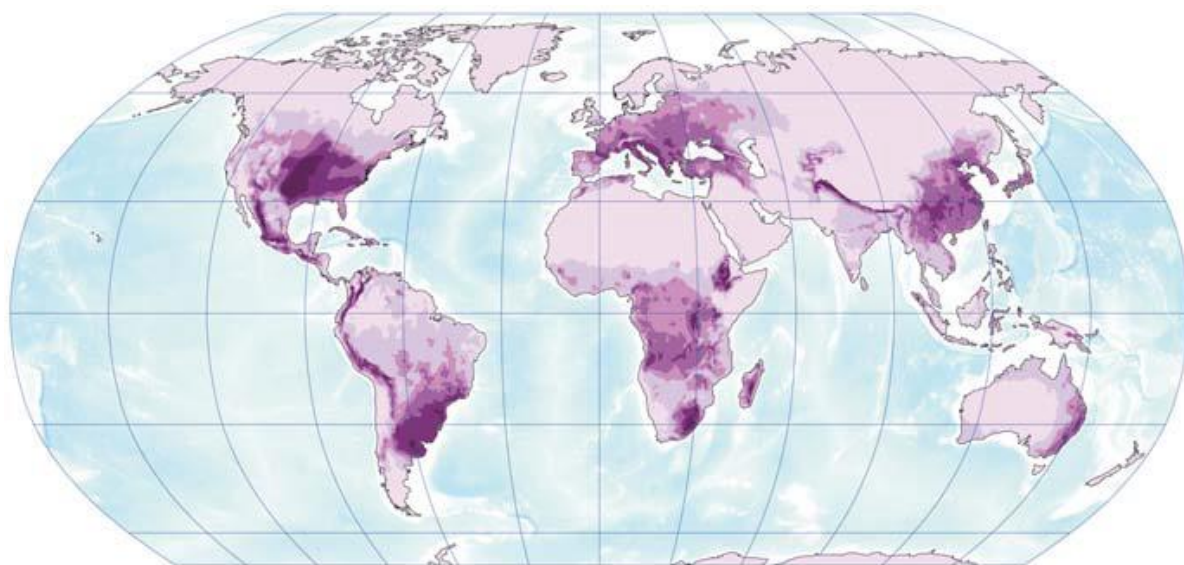


Obr. 3.2 Geografické rozložení počtu dnů s krupobitím na Moravě a ve Slezsku v letním půlroce období 1961-2000. Převzato z Chromá (2006).

Roční chod krupobití je patrný z histogramů s průměrnými měsíčními počty dnů s kroupami uvedených v Atlasu podnebí Česka (2007). Maxima se objevují nejvíce v květnu a v červnu. V dubnu na žádné stanici nepřevyšuje průměrný měsíční počet dnů s kroupami hodnotu 0,7. V červnu překračují hodnotu 1 pouze stanice Praděd a Lysá hora. Nejvyšší průměrnou měsíční hodnotou je 1,9 v květnu na Pradědu.

Pokud se budeme zabývat celosvětovým rozložením četnosti krupobití, tak na všech kontinentech kromě Antarktidy nalezneme oblast, kde je krupobití časté (Gokhale, 1975). Nejčastěji se krupobití vyskytuje v kontinentálních oblastech středních zeměpisných šířek, směrem k pólům a rovníku četnost klesá. Oblasti s každoroční bodovou četností krupobití 3 až 10 událostí, pokrývají pouze malou část zemského povrchu. Některé z nich se ale

nacházejí v hlavních zemědělských oblastech, a tak četnost a síla krupobití často výrazně ovlivňují zemědělskou produkci. Dvě největší souvislé oblasti s významnou četností krupobití nalezneme na severní polokouli. První taková oblast je na severoamerickém kontinentu a rozkládá se od kanadských provincií Alberta a Saskatchewan směrem k jihu přes Dakotu, Nebrasku, Colorado a Kansas až po Oklahomu a Texas. Druhá významná oblast se rozkládá v Evropě od jižní Francie přes Švýcarsko, jižní Německo, severní Itálii, Rakousko a dále k východu až po kavkazskou oblast (Kessler, 1992).



Obr. 3.3 Četnost a intenzita krupobití. Převzato z *Weltkarte der Naturgefahren* (2009).

Množství studií se zabývá klimatologií krupobití na území jednotlivých států, nebo jejich částí. Prostorové rozložení krupobití v severním Řecku vykazuje velkou proměnlivost, lokální maxima se objevují ve vyšších nadmořských výškách a v blízkosti horských bariér, v přímořských oblastech jsou četnosti krupobití menší (Sioutas et al., 2009). Webb et al. (2009) třídili všechna zaznamenaná krupobití nad Velkou Británií a Irskem podle stupnice intensity (Hailstorm Intensity Scale, kategorie H0-H10) a největší frekvenci bouří kategorie H2 či vyšší zaznamenali v centrální a Východní Anglii. Vinet (2001) vytvořil první mapu frekvence a intenzity krupobití ve Francii. Použil data ze sítí měření krupobití a data z pojistných událostí. Oblastmi Francie nejvíce postiženými krupobitím jsou jihozápad a jihovýchod s výjimkou pobřeží Středomořího moře.

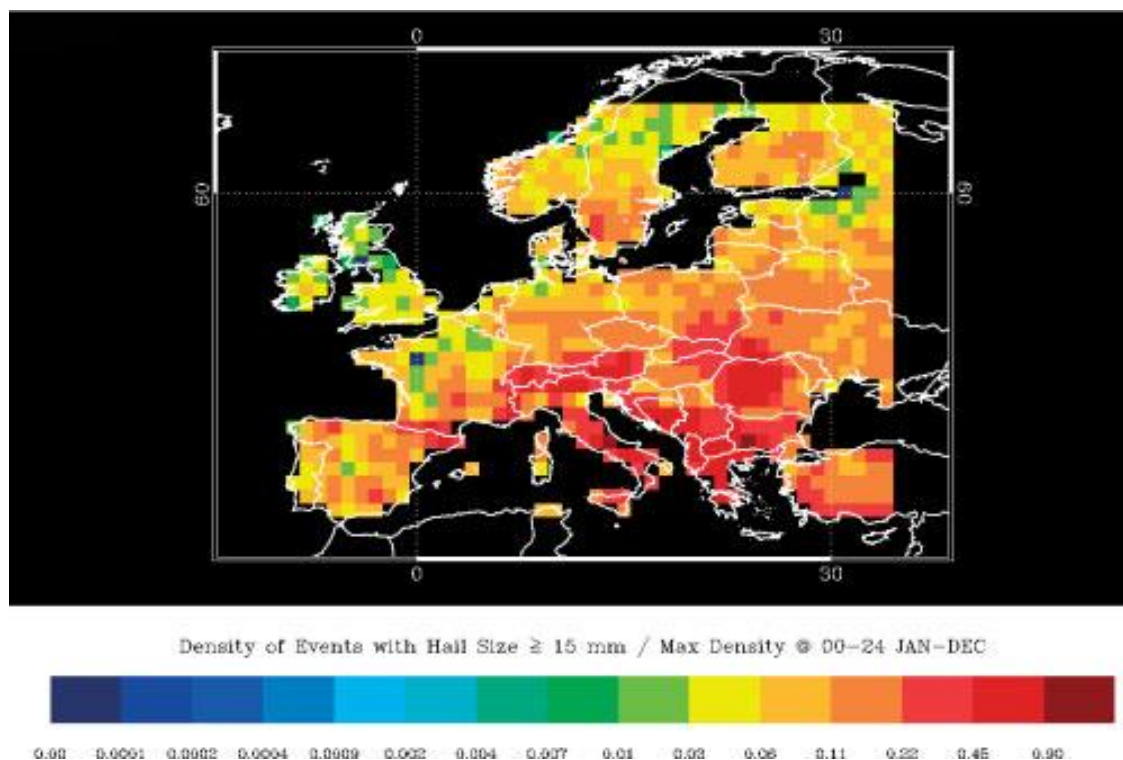
Tuovinen et al. (2009) sesbírali ve Finsku záznamy o krupobitích s kroupami většími než 2 cm za období 1930-2006. Z 240 zaznamenaných událostí nebezpečného krupobití se většina odehrála mezi 14. a 20. hodinou místního času, přičemž větší kroupy (od 4 cm) se

objevovaly spíše po 16. hodině. Záznamy o krupobití z novinových zpráv a od dobrovolných pozorovatelů bouří ve Finsku dále porovnávali s klimatologií krupobití odvozenou z radarových dat s pomocí Waldvogelova vztahu mezi výškou odrazivosti 45 dBZ a výškou nulové izotermy. Časové a prostorové rozložení a pravděpodobnost krupobití detekovaných radarem se ukázala být meteorologicky odůvodněná. Radarové techniky umožňují lepší prostorové a časové rozlišení než kterékoliv pozemní pozorování (Saltikoff et al., 2010).

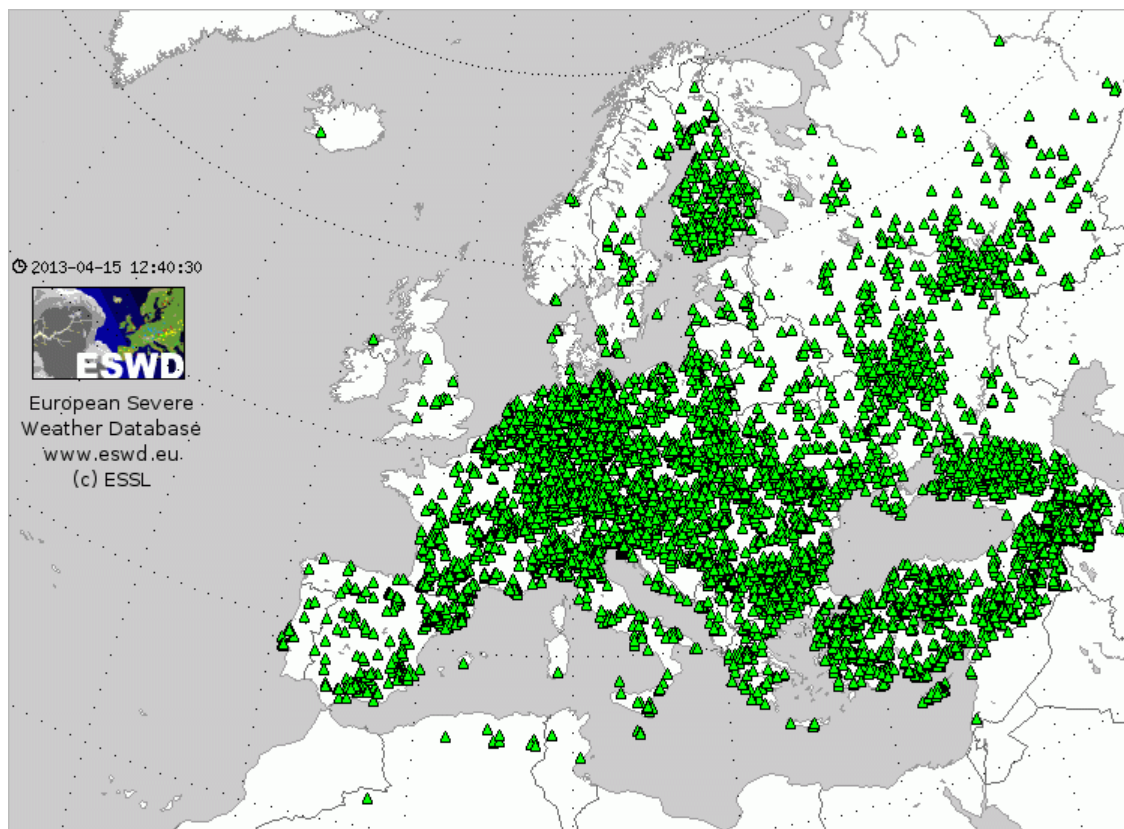
Klimatologická studie krupobití v Číně (Zhang et al., 2008) zahrnuje pozorování z období 1961-2005. Výsledky ukazují, že nejčastěji se krupobití objevují ve vysokohorských oblastech a na severních pláních. Nejvíce se krupobití vyskytuje v centrální části Tibetské náhorní plošiny. Co se týče denního chodu krupobití, odehrává se většinou mezi 15. a 20. hodinou místního času, jen ve dvou provinciích v centrální západní Číně jsou krupobití zaznamenána spíše v noci. V další studii (Xie et al., 2008) se čínští vědci zaměřili na trend v četnosti krupobití v letech 1960-2005. Do začátku osmdesátých let nevykazují data trend v průměrném počtu kroupových dní, ale poté se projevuje výrazný pokles.

Také studie zabývající se klimatologií krupobití v oblasti Sydney a okolí (Schuster et al., 2005) ukazuje na pokles četnosti krupobití v posledních 14 letech studovaného období 1805-1998. Průměrně bylo v oblasti Sydney v posledních padesáti letech studovaného období zaznamenáno 10 krupobití za rok. Ale v posledních 14 letech období je statisticky významný pokles v četnosti krupobití v centrální oblasti Sydney (7,6 bouří s krupobitím za rok) oproti předcházejícím 36 letům (11,4 bouří s krupobitím ročně).

Hand a Cappelluti (2011) použili výstupy globálního modelu UK Met Office, konkrétně vertikální profily teploty a vlhkosti, k vytvoření globální klimatologie krupobití. Nástrojem pro diagnózu krup byla část procedury pro diagnózu konvekce (CDP = „Convective Diagnosis Procedure“). Na kroupy se usuzuje, pokud CAPE vzduchové částice je větší než 50 J/kg, teplota horní hranice oblačnosti je nižší než -20°C, vertikální rozsah oblaku je přes 3500 m a základna leží níže než 5000 m nad povrchem. Takové podmínky by měly určovat zvýšenou pravděpodobnost výskytu kumulonimbů se silnými vzestupnými proudy, přechlazenou kapalnou vodou a se správným rozsahem oblaku nad nulovou izotermou. Pomocí CDP byly vytvořeny lokální klimatologie krupobití, mezi jinými i pro Evropu (obr. 3.4). Tyto odhady jsou s pozorovanými rozloženími krupobití v obecné shodě, ale významně se liší ve velikosti.



Obr. 3.4 Roční hustota kroupových dní v Evropě podle CDP. Předpokládanou roční četnost krupobití v každém čtverci $1^\circ \times 1^\circ$ lze vyčíslit vynásobením hustoty 22. (Převzato z Hand a Cappelluti, 2011).



Obr. 3.5 Krupobití zaznamenaná v databázi ESWD za období 2000-2012 a označená jako potvrzená či plně ověřená. (Převzato z www.essl.org/ESWD/).

Informace o výskytu krupobití lze nalézt v Evropské databázi nebezpečných meteorologických jevů (European Severe Weather Database: www.essl.org/ESWD/). V této databázi jsou shromažďovány informace o výskytu nebezpečných meteorologických jevů na území Evropy. Mezi nebezpečné jevy jsou zařazeny i velké kroupy, které jsou zde definované následovně: „Nebezpečné krupobití: Padající kroupy mající v průměru (nebo v nejdelším rozměru) 2 centimetry a/nebo množství menších krup, které vytvoří vrstvu 2 cm a více na plochých částech zemského povrchu“ (www.essl.org/ESWD/ - definice). Na obr. 3.5 jsou vyznačena místa dokumentovaného krupobití v letech 2000 až 2012, jedná se o zprávy potvrzené či plně ověřené.

3.3 Vztah krupobití k orografii

Jak uvádí Kessler (1992) v horských oblastech jsou pozorovány vyšší četnosti jakéhokoliv krupobití, tedy bez ohledu na velikost krup. V této souvislosti Knight a Knight (2001) uvádí, že je patrně ke škodě, že z definice jsou kroupy již od 5 mm. Takto malé ledové částice jsou běžnou součástí konvekčních srážek a obvykle roztají před dopadem na povrch, pokud ovšem povrch není příliš blízko k základně oblaku.

Častá je maximální četnost krupobití v sušších závětrných oblastech vysokých pohoří. Příkladem tohoto rozložení jsou krupobití ve stepích severozápadní Argentiny, v údolí Pádu v Itálii, v jižní Francii, na východě Nového Zélandu, v Jižní Africe a v kavkazských částech Ruska.

Lokální vlivy, jakým je orograficky podmíněný systém místního proudění vytvářející zóny horizontální konvergence, jsou rozhodující pro výskyt bouří a krup (Kunz et al., 2009). V jihozápadním Německu je krupobití nejčetnější a zároveň nejintenzivnější v okolí Stuttgartu, tedy v oblasti mezi pohořími Schwarzwald a Švábská Alba (Puskeiler, 2009). Vliv orografie na krupobití se potvrdil v Řecku, kde zaznamenali lokální maxima ve výskytu krup ve vyšších nadmořských výškách a v blízkosti horských bariér. Naopak nižší frekvenci krupobití zaznamenali v blízkosti moře (Sioutas et al., 2007). Pozorování v Číně také ukazují, že krupobití se častěji vyskytují v horských oblastech (Zhang et al., 2008).

Možnými vlivy orografie na krupobití jsou zejména změny ve vzhledu a struktuře bouře při přechodu kopcovitého nebo horského terénu. Jedním z nejzřetelnějších vlivů topografie jako překážky proudění vzduchu je jeho vychýlení. To může způsobit vznik oblastí

konvergence a divergence, a tedy vznik vzestupných či sestupných proudů. Prostorové rozložení průměrné doby trvání krupobití a jeho ničivých účinků počítané pro kontinentální část Chorvatska za období 1981 až 2006 ukazuje vliv orografie na zpomalení postupu a růst bouřkových buněk před překážkou (Počakal et al., 2009).

3.4 Případové studie krupobití v literatuře

Pro výzkum krupobití jsou významné případové studie nebezpečných bouří s vypadáváním krup. Takových studií lze nalézt v literatuře mnoho, zde uvádím některé příklady pro oblast střední Evropy. Na jihozápadě Slovenska se 9. 5. 2003 vyskytla bouře s nebezpečnými větry a rozsáhlým krupobitím (Kaňák et al., 2007). Na radarových snímcích byly rozpoznány znaky typické supercely s vyjádřením BWER („bounded weak echo region“). Typické znaky supercely, BWER a hook echo, vykazovala také bouře, která se vyvinula 4.8.2006 nad Srbskem (Berdon, 2009). Tuto bouři provázela silná dešť, ničivý vítr a kroupy s maximálním průměrem nad 3,5 cm.

Případová studie dvou mezosynoptických konvektivních systémů (MCS), které přešly nad Maďarskem 29.6.2006, kombinuje data radarová, satelitní a z detekce blesků (Putsay et al., 2009). Takto kombinovaná data jsou vyhodnocena jako užitečná pro posouzení relativního umístění hlavních vzestupných a sestupných proudů a důležitých vlastností nebezpečných bouří.

Dalším studovaným případem je silné krupobití z 15. 8. 2010 v oblasti Prahy. Silné bouře se toho dne vyskytovaly v mnoha oblastech střední a východní Evropy a jedna z buněk, které se vytvořily v odpoledních hodinách v jižních Čechách, zasáhla silným krupobitím Prahu. Púčik et al. (2013) se zabývali touto bouří s ohledem na její vlastnosti sledované pomocí satelitních snímků, věnovali se zejména neobvykle teplému vzhledu horní hranice oblačnosti.

4. Metody detekce krup z radarových dat

Meteorologické radary pokrývají svým měřením velké souvislé plochy a poskytují data s dobrým časovým a prostorovým rozlišením. Informace z radarů jsou proto vhodné pro využití při detekci krup. Byly vyvinuty různé postupy, jak pomocí radarových měření identifikovat kroupy. Metody pro detekci krup jsou navrhovány tak, aby v radarové informaci vyhledaly příznaky, které odpovídají fyzikálním procesům spojeným se vznikem a vypadáváním krup. Vysoké hodnoty radarové odrazivosti reprezentují silně odrážející, tedy velké, cíle. Vysoké odrazivosti v dostatečné výšce nad povrchem tak ukazují na silný vzestupný proud, který je schopen udržet kroupy ve výšce během jejich vývoje. Často používaná informace o výšce nulové izotermy zastupuje termodynamické vlastnosti prostředí. Reflektuje tedy potenciál pro přítomnost zásob přechlazené vody v atmosféře. Výška nulové izotermy také ukazuje, kolik času má vypadávající kroupa na tání v oblastech kladných teplot.

Radarové techniky k detekci krup můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou ty techniky, které přímo detekují přítomnost krup, druhou skupinou jsou ty, které nepřímo usuzují na přítomnost krup na základě struktury mateřské bouře (Witt a Nelson, 1991).

4.1 Jednoduché metody

První přímé metody detekce krup vycházely z velikosti a rozložení radarové odrazivosti. Jednoduchou metodou pro odlišení krup od deště je tzv. CAPPI metoda, tedy použití prahové hodnoty odrazivosti v určité hladině konstantní nadmořské výšky. Geotis (1963) navrhl prahovou hodnotu 55 dBZ. Tak vysoká radarová odrazivost by pro kapalnou vodu znamenala nepravděpodobně vysoké srážkové úhrny (Mason, 1971). Z tabulky 4.1 je zřejmé, že hodnota odrazivosti 55 dBZ by odpovídala výjimečné okamžité intenzitě srážek 100 mm/h. Auer (1994) odvodil hodnotu 53,5 dBZ pro kroupy s průměrem 1 cm, za předpokladu, že kroupy zaplňují celý radarový paprsek.

Tab. 4.1 Závislost intenzity srážek R na radiolokační odrazivosti Z podle Marshallova-Palmerova vztahu $Z_e = 200R^{1,6}$, kde $Z[\text{dBZ}] = 10 \log Z_e [\text{mm}^6/\text{m}^3]$. Upraveno podle Řezáčová et al. (2007).

| $Z [\text{dBZ}]$ | 7 | 15 | 23 | 31 | 39 | 47 | 55 |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| $R [\text{mm/h}]$ | 0,1 | 0,3 | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 |

Metoda maximální odrazivosti je rozšířením předchozí techniky. Používá maximální odrazivost přes celý vertikální rozsah namísto odrazivosti z konstantní hladiny. Touto metodou lze detekovat vyvíjející se jádro vysoké odrazivosti v různých výškách.

Dlouho užívaným indexem pro silné krupobití je vertikálně integrovaný vodní obsah „VIL“. VIL je nelineární funkcí odrazivosti a převádí data radarové odrazivosti na odhady ekvivalentního obsahu kapalné vody. Převod se zakládá na teoretických studiích velikostního rozložení kapek a na empirických studiích odrazivosti a kapalného vodního obsahu.

$$VIL = \sum 3,44 \times 10^{-6} [(Z_i + Z_{i+1})/2]^{4/7} \Delta h, \quad (4.1)$$

kde Z_i a Z_{i+1} jsou hodnoty radarové odrazivosti ve spodní a vrchní části vrstvy (mm^6m^{-3}) a Δh je tloušťka vrstvy v metrech. Rozměr VIL je pak (kg/m^2). Protože VIL vzrůstá se vzrůstající odrazivostí (podle vztahu 4.1), znamenají vyšší hodnoty VIL přítomnost velkých cílů, tedy velké kroupy ve vzduchu. Bylo zjištěno, že bouře v chladnějších vzduchových hmotách mohou produkovat silné krupobití při nízké hodnotě VIL 25 – 35 kg/m^2 , zatímco bouře v teplejších vzduchových hmotách jsou často bez krup při velkých hodnotách VIL = 50 – 60 kg/m^2 (Amburn a Wolf, 1997). Nižší hodnoty VIL spojené s krupobitím v chladnějších vzduchových hmotách vysvětlují Giaioti et al. (2003) na příkladu oblasti Friuli Venezia Giulia, kde díky chladnější mezní vrstvě v dubnu a květnu dopadají k povrchu i malé kroupy.

Aby byly eliminovány tyto lokální vlivy, bylo potřeba určit prahovou hodnotu VIL pro konkrétní den, tedy „VIL of the day“. Tzv. VIL_{day} je lokálně určená hodnota VIL podle podmínek prostředí v konkrétním dnu. Ale VIL_{day} je založený na potenciálně problematických předpokladech. Prvním takovým předpokladem je, že všechny bouře v dosahu radaru mají stejné vlastnosti (rychlost růstu, maximální výška echa, pohyb, trvání). Tak to ale ve skutečnosti není, ne všechny bouře ve stejné vzduchové hmotě produkují kroupy a ještě méně kroupy stejné velikosti. Dalším problémem jsou bouře blízko radaru, u kterých radar nezaznamená nejvyšší oblasti a VIL je tak počítána z „useknuté“ bouře. Dochází k podhodnocení VIL a bouře nedosáhne prahové hodnoty VIL_{day} , přestože může obsahovat velké kroupy. Konečně, VIL_{day} se mění nejen s ročním obdobím, ale také ze dne na den. To vede k nízkým hodnotám VIL v nízkých bouřích a naopak.

Tyto problémy řeší Amburn a Wolf (1997) zavedením tzv. „hustoty VIL“. Jedná se o hodnotu VIL (kg.m^{-2}) dělenou výškou echotopu (m). Výsledek se násobí tisícem pro získání hodnoty v g/m^3 . Hustota VIL (VIL_{dens}) může být použita k rychlému odhalení bouří s vysokou

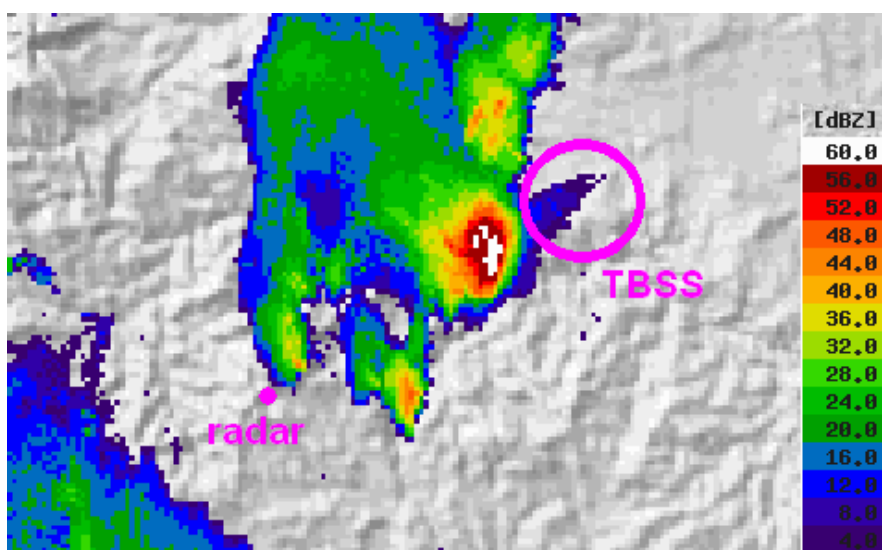
odrazivostí relativně k jejich vertikálnímu rozsahu. Takové bouře často obsahují kroupová jádra. Je-li hodnota VIL_{dens} 3,5 – 4,0 g/m³ nebo vyšší, budou mít kroupy pravděpodobně průměr 2 cm nebo větší. Amburn a Wolf (1997) studovali 221 bouří, které se vyskytly od listopadu 1994 do července 1995 v oblasti radaru KINX WSR-88D v Inola, Oklahoma. Výsledky ukázaly, že 90% bouří, které produkovaly silné krupobití, měly $VIL_{dens}=3,5$ g/m³ nebo větší a naopak hranice 3,5 g/m³ falešně identifikovala jako silné méně než 2% případů. Neplánovaným přínosem bylo, že VIL_{dens} se ukázala jako možný nástroj pro odhad velikosti krup.

Mimo výše popsaných metod byly v posledních letech publikovány další studie zabývající se metodami rozpoznávání krup na základě samotných radarových informací. V Číně (Lu a Yang, 2006) vytvořili nový koncept nazývaný hustota odrazivosti k odlišení oblaku s kroupami od oblaku dešťového na základě obrazu radarové odrazivosti. Po rozpoznání oblaku systém určí oblast dopadu krup za použití detekce „hook“ echa nebo pixelu s odrazivostí nad 60 dBZ.

Lemon (1998) popsal jako dostatečnou podmínku pro detekci krup z radarových měření výskyt tzv. „flare echa“, v této studii používá název „three-body scatter spike“ (TBSS). Jedná se o artefakt objevující se v datech radarové odrazivosti, jak ilustruje obrázek 4.1. Je to 10 – 30 km dlouhá oblast nízké odrazivosti přiléhající radiálně za jádro vysoké odrazivosti (směrem od radaru). Vysvětlením je rozptyl, který nesplňuje předpoklad Rayleighova rozptylu mikrovln od oblasti s velkými hydrometeory. TBSS je výsledkem trojnásobného odrazu: část energie elektromagnetického pulsu z radaru je od silně odrážejících hydrometeorů rozptýlena nejprve k zemskému povrchu, odtud zpět k hydrometeorům a teprve posléze zpět k radaru. Vznikne časové prodlení, které radar interpretuje jako vzdálenější cíl. Rozpoznání TBSS může poskytnout varování před krupobitím, protože výskyt TBSS obvykle předchází silnému krupobití (s kroupami o průměru od 2,5 cm) o 10 až 30 minut (Lemon, 1998).

Metody používající pouze radarovou odrazivost však mají omezenou schopnost detekovat kroupy. Naměřená odrazivost závisí na koncentraci hydrometeorů, jejich fázi a rozdělení velikosti. Mnoho malých krup může odrážet více energie než malý počet krup velkých. Mokrý kroupy odrážejí více než kroupy suché. Radar měří průměrnou odrazivost v objemovém vzorku, který může obsahovat směs krup a kapalných částic. Z toho pak plyne, že neexistuje přímý vztah mezi naměřenou odrazivostí a hustotou a velikostí krup. Z toho

důvodu byly navrženy následující metody, které využívají další meteorologické informace, například vertikální teplotní zvrstvení (Delobbe a Holleman, 2006).



Obr. 4.1 TBSS za bouří s krupobitím 15.8.2010 v 18:50 UTC. Zdroj: ČHMÚ.

4.2 Využití doplňkových informací

Mnoho metod používá kromě radarových dat také informace z dalších zdrojů. Jsou to zejména informace o vertikálním profilu teploty atmosféry, získávané z aerologických sondáží, případně z výstupů meteorologických modelů.

Často používaný je algoritmus odvozený Waldvogelem (Waldvogel et al., 1979), který se používá v různých modifikacích. Waldvogel navrhl jednoduché kritérium, při němž jsou kroupy detekovány, pokud platí:

$$H_{45} \geq H_0 + 1,4 \text{ km}, \quad (4.2)$$

kde H_{45} je výška nejvyšší izolinie 45 dBZ a aby bylo kritérium splněno, musí překonat výšku nulové izotermy H_0 o více než 1,4 km. Tento algoritmus odhalí všechny buňky kroupových bouří v rané fázi existence, ale přibližně 30% buněk identifikovaných takto jako nebezpečné nevytvoří kroupy dopadající k zemi. Z Waldvogelova kritéria vychází algoritmus počítaný operativně v ČHMÚ k určení pravděpodobnosti výskytu krup. Tento algoritmus ve formě produktu HAIL PROB dává 100% pravděpodobnost výskytu krup, pokud se vyskytuje odrazivost nad 45 dBZ v hladinách přesahujících nulovou izotermu o 5,5 km, naopak při výšce menší než 1,625 km se předpokládá pravděpodobnost nulová (Řezáčová et al., 2007).

V Nizozemí je používán vztah pro pravděpodobnost výskytu krup POH (Probability Of Hail), také odvozený podle Waldvogelova kritéria (Delobbe a Holleman, 2006):

$$POH = 0,319 + 0,133 \Delta H(km), \quad (4.3)$$

$$\Delta H = H_{45} - H_0. \quad (4.4)$$

Na Novém Zélandu vyvinul Auer (1994) metodu, která kombinuje radarovou odrazivost s teplotou horní hranice oblačnosti. Teplota horní hranice oblačnosti (T_B) je získávána ze satelitních dat nebo z analýzy aerologické sondáže. Lineární regresí odvodil Auer vztah pro odlišení deště a krup. Hardaker a Auer (1994) definují podmínku pro výskyt krup $h \geq 0$, kde

$$h = 2,6 \times Z_e + T_B - 85, \text{ pro } T_B \leq -10^\circ\text{C}, \quad (4.5)$$

$$h = 0,75 \times Z_e - T_B - 38,75, \text{ pro } T_B > -10^\circ\text{C}. \quad (4.6)$$

Pro velikost krup pak platí:

$$D_H = \frac{10^{\frac{Z}{10}}}{561}, \text{ pro } h \geq 0, \quad (4.7)$$

$$D_H = 0, \text{ pro } h < 0, \quad (4.8)$$

kde D_H je průměr krup v milimetrech.

Další metoda k rozpoznávání krup za pomoci VIL byla vyvinuta a testována během Projektu demonstračních předpovědí v Sydney 2000 (Forecast Demonstration Project). Jedná se o empiricky založený algoritmus využívající k předpovědi velikosti krup výšku hladiny mrznutí, VIL a nejvyšší výšku odrazivosti 50 dBZ (Delobbe a Holleman, 2006).

Witt a kol. (1998) popisují algoritmus pro detekci krup (HDA = hail detection algorithm) používaný v síti NEXRAD (WSR-88D). HDA pro každou zachycenou bouřkovou celu dává tři informace: pravděpodobnost krup (jakkoliv velkých), pravděpodobnost silného krupobití (kroupy s průměrem od 19 mm), maximální očekávanou velikost krup. Algoritmus předpokládá, že odrazivosti nad 40 dBZ nad nulovou izotermou pravděpodobně indikují výskyt krup a velkou váhu pak dává odrazivostem nad 50 dBZ při výskytu nad hladinou -20°C . K určení přítomnosti krup jakékoliv velikosti se užívá výška echa 45 dBZ nad hladinou tání. Podle Waldvogela et al. (1979) byl odvozen jednoduchý vztah mezi touto výškou a pravděpodobností krup dopadajících na zemský povrch. Vztah je totožný s produktem HAIL PROB popsáním výše. K detekci nebezpečných krup byl odvozen „index nebezpečných krup“

(SHI = severe hail index). SHI je teplotně a odrazivostí vážená vertikální integrace profilu odrazivosti bouřkové cely.

$$SHI = 0,1 \int_{H_0}^{H_T} W_T(H) W(Z) \dot{E} dH. \quad (4.9)$$

Přístup vychází z VIL algoritmu (také se jedná o vertikální integraci odrazivosti) a vylepšuje ho. První změnou je posun od gridu k cele (buňce). K identifikaci buňky se používá algoritmus SCIT (Storm Cell Identification and Tracking algorithm) popsáný v práci (Johnson et al., 1998). Algoritmus SCIT používá sedm prahových hodnot odrazivosti, pomocí kterých jsou vybrány jednorozměrné segmenty dále spojované do dvourozměrných komponent a posléze do třírozměrných buněk. Identifikací buňky se ruší problém kroupového jádra rozloženého přes hranici gridu. Nevýhodou naopak je možná chyba HDA, pokud byla chybně identifikována cela. Druhou změnou je použití vztahu odrazivost – kroupy, namísto vztahu odrazivost – kapalná voda (jak je tomu u VIL). Hodnoty odrazivosti jsou transformovány na hodnoty toku kinetické energie krup (\dot{E}). Semi-empirický vztah mezi tokem kinetické energie krup a odrazivostí popsali Waldvogel et al. (1978a,b).

$$\dot{E} = 5 \times 10^{-6} \times 10^{0,084Z}. \quad (4.10)$$

Třetí změnou je užití teplotně vážené vertikální integrace. Funkce pro váhu na základě teploty vychází z toho, že kroupy rostou pouze při teplotě pod 0°C a k růstu velkých krup většinou dochází při teplotě pod -20°C. Funkce pro vážení odrazivostí dává nulovou váhu hodnotám pod 40 dBZ a jednotkovou váhu odrazivosti od 50 dBZ výše. Pravděpodobnostní funkce pro silné krupobití (POSH = probability of severe hail) byla vyvinuta metodou pokusů a omylů a následnou kalibrací z vybraných dat.

$$POSH = 29 \ln \left(\frac{SHI}{WT} \right) + 50. \quad (4.11)$$

Pokud je POSH < 0, pak POSH = 0 a pokud je POSH > 100, pak POSH = 100. Výsledek se zaokrouhluje na desítky procent. Prahová hodnota WT (warning threshold) je dána empirickým vztahem

$$WT = 57,5H_0 - 121, \quad (4.12)$$

$$pro WT < 20 je WT = 20. \quad (4.13)$$

SHI byl také použit k odhadu maximální očekávané velikosti krup (MEHS = maximum expected hail size). Empiricky byl odvozen vztah

$$MEHS = 2,54(SHI)^{0,5}. \quad (4.14)$$

4.3 Využití dopplerovských informací

Další možností identifikace krup je využití dat o radiální rychlosti. Z radiální rychlosti je možné určit, zda se jedná o bouři typu supercely, a proto je statisticky pravděpodobné, že bude produkovat kroupy. Witt a Nelson (1991) korelovali divergenci proudění na vrcholu bouře s možnou maximální velikostí krup. Tato technika počítá s tím, že divergence na vrcholu bouře je mírou velikosti vzestupného proudu a tato velikost silně koreluje s maximální velikostí krup. Síla maximálního vzestupného proudu může být indikátorem velkých krup, i když bouře s rozsáhlou oblastí vzestupných proudů střední velikosti (20-40 m/s) jsou jako producenti významných krupobití významnější, než ty s vzestupným proudem nad 40 m/s. Ale bouře s velmi silnými vzestupnými proudy obsahují i významné oblasti vzestupných proudů středních velikostí.

Hodnoty rychlosti maximálního vzestupného proudu i velikosti horizontálního rozsahu vzestupného proudu ve vyšších hladinách bouře mohou být odvozeny z Dopplerovských radiálních rychlostí. K odhadu velikosti divergentního toku pomocí dat z Dopplerovského radaru byly odvozeny dvě různé techniky. První je maximální rozdíl radiální rychlosti v oblasti divergentního toku (ΔV). Hodnota ΔV je dána rozdílem maximální a minimální hodnoty Dopplerovské rychlosti. Síla a plošný rozsah vzestupného proudu ve středních hladinách (kde vznikají kroupy) se odráží v celkovém objemovém toku ve vyšších hladinách bouře. Druhou technikou je použití parametru oblasti vysokého radiálního střihu (HRSA = high radial shear area). Jedná se o indikátor, který zahrnuje jak rychlost, tak plošný rozsah vzestupného proudu. Rychlost a plošný rozsah vzestupného proudu lze vyjádřit pomocí celkového toku hmoty ve vrchních částech bouře. Vzhledem k možnostem Dopplerovského radaru se pro tento tok použije radiální střih (jako náhrada radiální divergence). Techniky ΔV a HRSA se ukázaly být vhodné pro odhad maximální velikosti krup, které bude bouře produkovat, s korelačním koeficientem mezi ΔV , HRSA a maximální velikostí krup 0,89, respektive 0,82. Odhady velikosti vykazovaly z 80% přesnost na $\pm 1,4$ cm (Witt a Nelson, 1991).

4.4 Využití polarimetrických veličin

Mnoho operativně používaných radarů ve světě stále využívá pouze lineární horizontální polarizaci vysílaného záření. Postupně jsou však zaváděny radary pracující

zároveň s horizontální i vertikální polarizací záření. Takzvané polarimetrické meteorologické radary jsou schopny souběžně pracovat s horizontálně i vertikálně polarizovaným zářením a mohou měřit hodnoty odrazivosti pro obě polarizace Z_H a Z_V . Speciální charakteristiky polarimetrických měření mohou pomoci rozlišit kroupy, které se při pádu převalují a nejsou tolik deformovány, od zploštělých dešťových kapek. Odrážející průřez zploštělých dešťových kapek je větší pro horizontální lineární polarizaci než pro vertikální lineární polarizaci, zatímco odrážející průřez krup je pro oba typy polarizace téměř shodný (Kennedy et al., 2001). Jednou z nejužívanějších polarimetrických veličin je diferenciální odrazivost Z_{DR} definovaná vztahem

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{Z_H}{Z_V}. \quad (4.15)$$

Největší hodnoty diferenciální odrazivosti (kolem 4 dB) dostáváme pro velké vodní kapičky, které jsou zploštělé. U téměř sférických srážkových částic nedosahuje Z_{DR} tak vysokých hodnot. Další veličinou je tzv. specifický posun diferenciální fáze K_{DP} vycházející ze skutečnosti, že rychlost horizontálně polarizované vlny při průchodu oblastí se zploštělými vodními kapičkami je menší než rychlost vertikálně polarizované vlny. Fáze horizontálně polarizovaného pulzu Φ_H se tedy zpožďuje za fází vertikálně polarizovaného pulzu Φ_V .

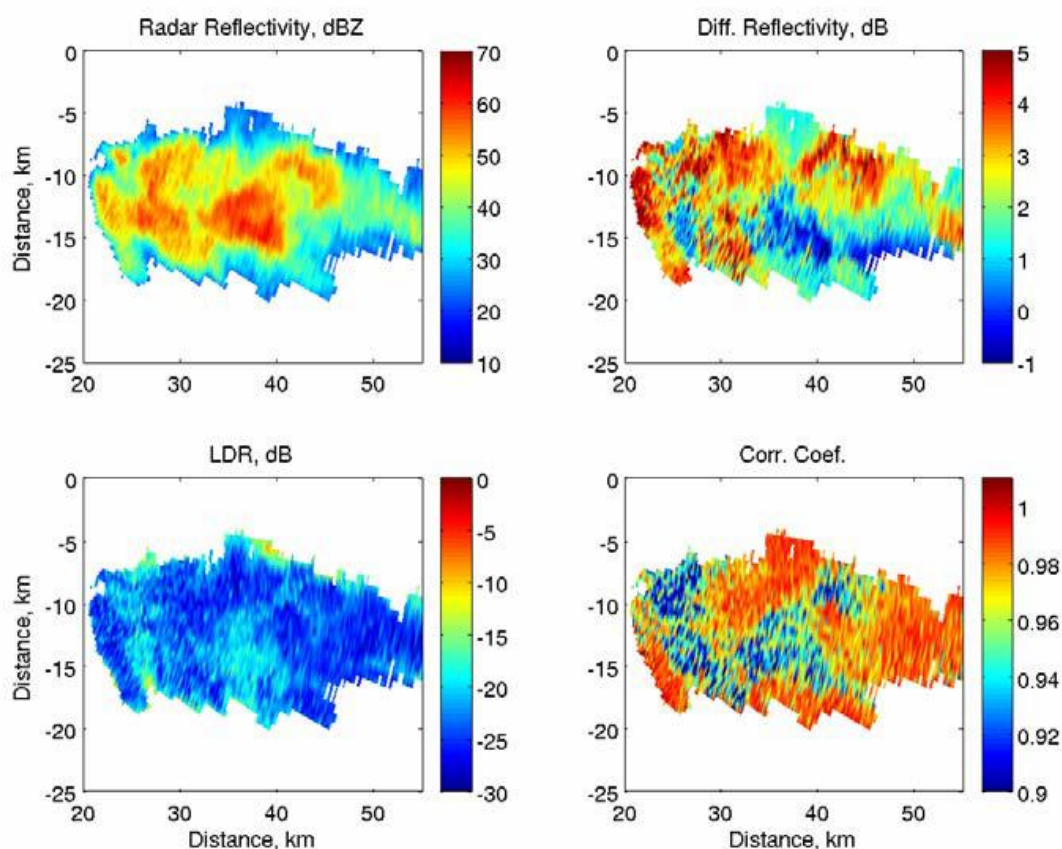
$$K_{DP} = \frac{\Delta \phi_{DP}}{\Delta r} = \frac{\Delta(\phi_V - \phi_H)}{\Delta r}. \quad (4.16)$$

Protože kroupy mají tendenci se převalovat a jejich orientace je chaotičtější než u kapek, je diferenciální odrazivost a specifický posun diferenciální fáze u krup podstatně nižší, než u deště se stejnou radarovou odrazivostí (Heinselman a Ryzhkov, 2006). Typickým příznakem krup tak jsou malé hodnoty Z_{DR} a K_{DP} . Týká se to však pouze suchých krup. Pokud jsou kroupy vlhké, případně ve směsi s deštěm, doprovází je naopak vysoké hodnoty Z_{DR} a K_{DP} (Tabary et al., 2009). Pro rozlišování typu odrážejících hydrometeorů se hodí i lineární depolarizační poměr (LDR), který je definován například vztahem

$$LDR = 10 \log \frac{Z_{HV}}{Z_V}. \quad (4.17)$$

Veličina Z_{HV} je odrazivost určená z přijatého odrazu s horizontální polarizací od pulsu vyslaného s vertikální polarizací. Z_{HV} má vysoké hodnoty pouze pro vodou obalené zploštělé ledové částice s osou nakloněnou vzhledem k horizontální rovině (Řezáčová et al., 2007). Lineární depolarizační poměr má v případě krup vyšší hodnoty než při dešti, kdy jsou hodnoty nižší než -25dB. Míru různorodosti tvarů hydrometeorů v objemu radarového pulsu

vyjadřuje korelační koeficient ρ_{HV} (co-polar correlation coefficient), který představuje korelaci časových řad Z_H a Z_V .



Obr. 4.2 Polarimetrická radarová měření silné bouře s krupobitím v Oklahomě 13.6.2002 v 0041 UTC. Radar měřící v pásmu S, elevace antény 1,2°. Převzato z Brandes a Ryzhkov (2004).

4.5 Využití více vlnových délek

K rozpoznávání krup byly navrženy i techniky používající rozdíly v pozorování na dvou různých vlnových délkách radaru. Poměr radarových odrazivostí při vlnových délkách 10 cm a 3 cm je pro kroupy mnohem větší než pro déšť. Problémem však je významný útlum signálu při použití vlnové délky 3 cm a také sladění obrazů ze dvou vlnových délek. (Heinselman a Ryzhkov, 2006)

Féral et al. (2003) navrhl k detekci krup použití dvou vzdálených radarů pracujících na vlnových délkách 5 cm a 10 cm. Pro bouři v dosahu obou radarů identifikoval oblast s odrazivostí 40 dBZ a vyšší a pro obě vlnové délky spočetl poměr průměrné odrazivosti jádra bouře a průměrné odrazivosti v okruhu do 3 km od jádra. Podíl tohoto poměru stanoveného

pro vlnovou délku 10 cm a 5 cm násobený 100 pak udává tzv. dual-wavelength reflectivity hail ratio (DWHR). Hodnoty DWHR vyšší než 100% pak ukazují na kroupy.

4.6 Testování a kombinace metod

Některé práce používají dříve popsané algoritmy vycházející z radarových dat a dále je třídí a posuzují. Lopez a Sanchez (2009) třídili proměnné podle jejich schopnosti rozpoznat bouři s kroupami pomocí logistické regrese a lineární diskriminační analýzy. Oba statistické modely vybraly téměř shodné radarové parametry, největší váha byla přisouzena parametru VIL. Marzban a Witt (2001) navrhli dvě neuronové sítě na základě parametrů vyvinutých v NSSL pro detekci krup z radarových dat a sondáží atmosféry. Jedna neuronová síť předpovídá velikost nebezpečných krup a druhá dělí kroupy do velikostních kategorií.

San Ambrozio et al.(2007) pracovali na vývoji nástroje k identifikaci krup v operativním provozu ve Španělsku. Vytvořili modul pro detekci krup kombinací VIL density a HDA (Hail Detection Algorithm). Novější španělská studie (Mallafre et al., 2009) posuzuje metody pro rozpoznání krup v bouři pro oblast údolí Ebro v severovýchodním Španělsku. Jako nejlepší parametr pro odlišení krup od srážek bez krup se zde ukázal tok kinetické energie, ale obecně mezi zkoumanými metodami nebyl významný rozdíl.

V Nizozemí (Holleman et al., 2000) testovali pět metod pro detekci krup a jako nejlepší se ukázala metoda podle Waldvogela. V rámci Projektu demonstračních předpovědí v Sydney 2000 (Joe et al., 2004) byly použity různé algoritmy pro detekci nebezpečného počasí. Přestože byly použité algoritmy odlišné (jeden využíval data z polarimetrických radarů), poskytly podobné výsledky. Delobbe a Holleman (2006) zkoumali nepřesnosti určení Echo-topu, protože tento parametr se často objevuje v operativně používaných algoritmech pro detekci krup. Vzdálenost od radaru ovlivňuje kvalitu dat zásadním způsobem a autoři proto doporučují používat Echo-top jen do vzdálenosti 150-160 km od radaru.

4.7 Metody detekce krup ze satelitních dat

Již zmíněná metoda (Auer, 1994) používá k detekci krup v kombinaci s radarovými daty také informace o teplotě horní hranice oblačnosti ze satelitních dat.

Bauer-Messmer a Waldvogel (1997) se zabývali možnostmi detekce a predikce krup pomocí samotných satelitních dat. Objevili, že od překročení prahové hodnoty v datech z Meteosatu ve viditelné oblasti do vypadávání krup, uběhne 90 minut. Prahová hodnota je

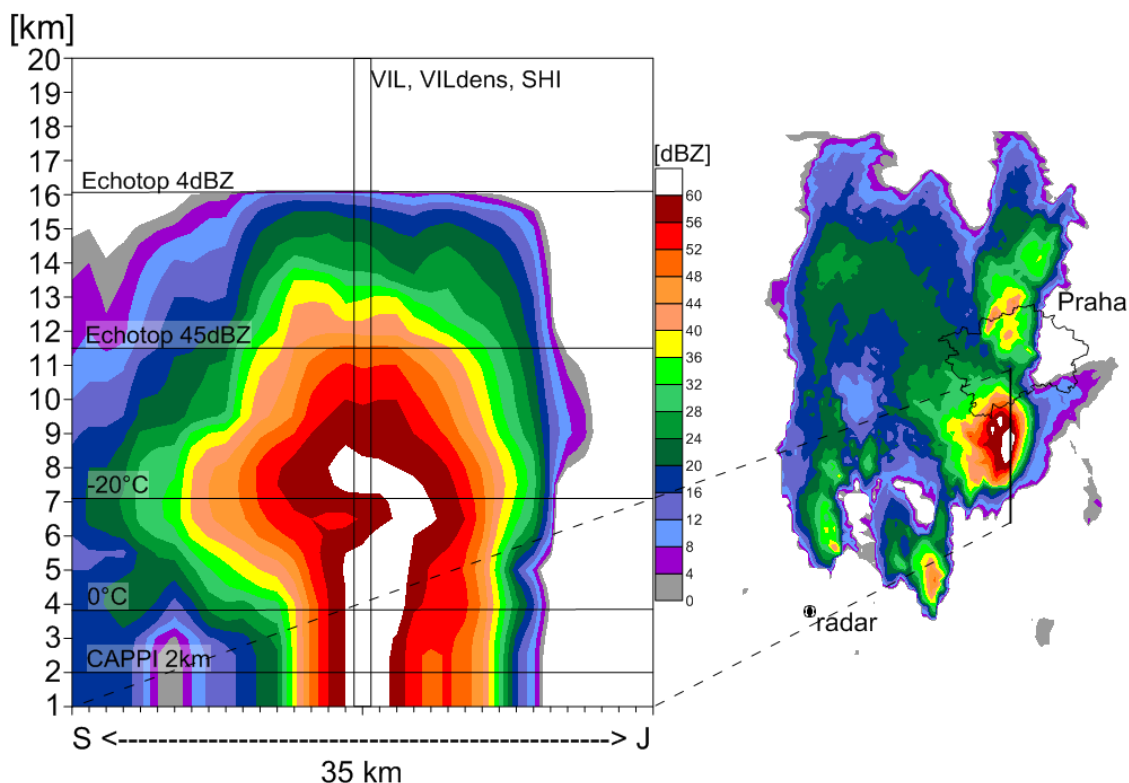
nutná, ale ne dostatečná podmínka detekce krup. Takto založená předpověď vykazuje pravděpodobnost detekce (POD) 100%, ale pravděpodobnost chybné detekce (FAR) 81%. Při použití doplňkových měření (sondáže) je hodnota FAR snížena pod 60%.

4.8 Detekce škod z krupobití

Silná krupobití způsobují velké škody na majetku. Hohl et al. (2002a, 2002b) se proto zabývali možností odhadu škod způsobených na budovách a automobilech pomocí kinetické energie krup vypočtené z radarových dat. Použití kinetické energie krup se ukázalo být užitečným pro odhad maximálních pravděpodobných škod na budovách a automobilech například pro potřeby pojišťoven. Metodu pro výpočet kinetické energie krup založenou na empirické závislosti pravděpodobnosti výskytu krup ve výšce (P_h) na výšce odrazivosti 45 dBZ nad nulovou izotermou (ΔH_{45}) nabízí Makitov (2007). Jeho metoda umožňuje předpovídat oblasti s největšími škodami na úrodě.

5. Použité algoritmy pro detekci krup

V předešlé kapitole jsou uvedeny metody pro detekci krup pomocí dat z meteorologických radarů a dalších informací. Pro svou práci jsem zvolila sedm metod, které vykazují teoreticky nejlepší výsledky a které bylo zároveň možné spočítat z dostupných dat. Zvolením dvou alternativ pro prahové odrazivosti u tří z metod vzniklo deset algoritmů, pro které byly hledány vhodné prahové hodnoty. V tabulce 5.1 je shrnuto deset testovaných algoritmů pro detekci krup a označení, které pro ně používám.



Obr. 5.1 Ilustrace vybraných kroupových kritérií - hodnoty v prostředním pixelu řezu: CAPPI 2km 60,5 dBZ, Z_{max} 62,5 dBZ, ΔH_{45} 7600 m, VIL 95 kg/m², VILdens 5,9 g/m³, SHI 205 J/m.s, POSH 71 %. Událost 15.8.2010 18:50UTC na jižním okraji Prahy. V levé části obrázku je vertikální profil odrazivosti s vyznačením výšek některých veličin. V pravé části obrázku je rozložení maximální odrazivosti v okolí Prahy s vyznačenou polohou radaru Brdy a pozicí vertikálního řezu.

5.1 CAPPI metoda

Metoda vychází z hodnot pole odrazivosti v hladině konstantní nadmořské výšky (Constant Altitude Plan Position Indicator). CAPPI se získává interpolací ze sousedních hladin pole odrazivosti na jednotlivých elevačních úhlech měření radaru. Pro CAPPI metodu se volí nízká nadmořská výška, kde ve větších vzdálenostech od radaru již nejsou měření. Používá se pak měření z nejnižšího elevačního úhlu a mluví se o tzv. PseudoCAPPI.

V Nizozemí (Holleman, 2001) používali CAPPI ve výšce 0,8 km. Schuster et al. (2006) použili pro východní Austrálii CAPPI ve výšce 1,5 km. S ohledem na typický rozsah nadmořských výšek území ČR a nadmořské výšky radarových stanovišť je v této práci použita PseudoCAPPI 2 km. Kroupy jsou metodou CAPPI detekovány, pokud hodnota radiolokační odrazivosti překročí definovanou prahovou hodnotu, která je v literatuře udávána 54 či 55 dBZ. Holleman (2001) našel nejvyšší hodnotu indexu úspěšnosti pro prahovou hodnotu 49 dBZ.

5.2 Metoda maximální odrazivosti

Rozšířením CAPPI metody je metoda maximální odrazivosti Z_{max} , která používá maximální hodnoty odrazivosti v celém měřeném vertikálním sloupci. Je tak možné detekovat i vyvíjející se jádro vysoké odrazivosti ve výšce. Prahové hodnoty Z_{max} pro detekci krup jsou shodné s prahy pro CAPPI metodu.

5.3 Metoda podle Waldvogela

Waldvogel navrhl kritérium (4.1) pro detekci kroupových buněk na základě testování staršího kritéria pro zahájení umělé infekce oblaků pro potlačení krupobití (Waldvogel et al., 1979). Při testování kritéria byla použita měření z radaru pracujícího na vlnové délce 3 cm. Data používaná v této práci pochází z měření radarů s vlnovou délkou 5 cm. To bylo také metodickým důvodem pro modifikaci prahové hodnoty odrazivosti.

V holandské studii (Holleman, 2001) je Waldvogelova metoda při prahové hodnotě 1,45 km pro výškový rozdíl nulové izotermy a 45 dBZ vyhodnocena jako nejlepší z osmi testovaných metod. Líšková ve své diplomové práci (Líšková, 2006) testovala Waldvogelovu metodu na datech ze slovenského radaru na Malém Javorníku a dospěla k podobným výsledkům jako výše zmínění studie Hollemana, včetně nejlepší prahové hodnoty 1,75 km. Na základě testování více kroupových kritérií doporučila Líšková Waldvogelovo kritérium k operativnímu použití na Slovensku.

5.4 Metody vycházející z VIL

Vertikálně integrovaný vodní obsah (VIL) převádí odrazivost měřenou ve vertikálním sloupci na vodní obsah pomocí semi-empirického vztahu. Přesto, že je VIL navržen tak, aby reprezentoval obsah kapalné vody, je často používán pro detekci krup. Jak poznamenávají Greene a Clark (1972), kroupy chybně zvyšují hodnoty množství kapalné vody, což ale může

být využito jako ukazatel síly bouře. VIL se udává v jednotkách kg/m^2 a hodnota 1 kg/m^2 by odpovídala 1 mm vody, pokud by veškerá detekovaná voda vypršela. Ve stratiformních dešťových oblacích hodnota VIL zřídka převyšuje 10 kg/m^2 . Typické nejvyšší hodnoty VIL v letních bouřích se pohybují od 50 kg/m^2 nad Floridou, přes 30 kg/m^2 v oblasti Velkých Plání po 20 kg/m^2 na severovýchodě USA (Kitzmiller et al., 1995). Prahová hodnota pro VIL tak silně závisí na oblasti a období výskytu bouře.

K vyřešení problému s prahovou hodnotou VIL bylo navrženo „normování“ VIL výškou horní hranice oblačnosti (echotopu), definovanou jako maximální výška jisté nízké odrazivosti. V této práci je použita prahová hodnota 4 dBZ. Dělením hodnoty VIL výškou echotopu vznikne veličina označovaná jako VIL_{dens} (hustota VIL), viz kapitola 4.1. Amburn a Wolf (1997) při výpočtu použili hodnotu echotopu buď ze stejného pixelu, ve kterém počítali VIL, nebo z pixelu, který k němu po větru přiléhá, pokud měl vyšší hodnotu. Zohledňovali tak případný pohyb bouře nebo její odklonění od vertikály. Pro odstranění možného problému s „ukloněnou“ bouří jsem proto pro výpočet VIL_{dens} v každém pixelu použila maximální hodnotu echotopu z okolních 3×3 pixelů. Amburn a Wolf (1997) navrhli pro VIL_{dens} univerzální prahovou hodnotu $3,5 \text{ g/m}^3$. Výhoda VIL_{dens} oproti VIL je však sporná. Edwards a Thompson (1998) ukázali, že použití prahové hodnoty VIL 38 kg/m^2 dává téměř shodné výsledky jako VIL_{dens} při prahu $3,5 \text{ g/m}^3$.

5.5 NEXRAD algoritmus pro nebezpečné krupobití

Součástí algoritmu pro detekci krup HDA (Hail Detection Algorithm) používaného v americké radarové síti NEXRAD (Witt et al., 1998) je i odhad pravděpodobnosti nebezpečného krupobití. V této studii se používá semi-empirický vztah pro přepočet vertikálního profilu odrazivosti na tok kinetické energie krup, jak ho odvodil Waldvogel et al. (1978a,b). Jak je popsáno v kapitole 4.2, z toku kinetické energie krup se počítá index nebezpečných krup (SHI) a dále pak pravděpodobnost nebezpečných krup (POSH).

Pro výpočet SHI (a následně i POSH) jsem použila gridové pole místo předem rozpoznaných bouřkových buněk, jak to v původním algoritmu uvádí Witt et al. (1998). Do výpočtu SHI vstupuje váhová funkce pro odrazivost, která dává nulovou váhu odrazivostem pod 40 dBZ a maximální odrazivostem od 50 dBZ výše. V originálním algoritmu jsou zvoleny hodnoty 40 a 50 dBZ, které je však možné přizpůsobit (Witt et al., 1998). Protože jsou tyto hodnoty nižší než hodnoty odrazivosti používané Federerem (1986), testovala jsem také

hodnoty 45 a 55 dBZ. Dále jsem hledala vhodné prahové hodnoty pro samotné SHI i POSH ukazující na výskyt krup.

Tab. 5.1 Označení a stručný popis testovaných metod detekce krup.

| Označení | stručný popis | jednotka |
|---------------------|--|------------------------------------|
| CAPPI | odrazivost v hladině nadmořské výšky 2 km | dBZ |
| Zmax | maximální odrazivost ve vertikálním sloupci | dBZ |
| VIL | vertikálně integrovaný obsah kapalné vody | kg/m ² |
| VIL _{dens} | hustota VIL – hodnota VIL dělená výškou echotopu | g/m ³ |
| SHI 40-50 dBZ | index nebezpečných krup – teplotně a odrazivostí vážený integrál odrazivosti s parametry odrazivosti 40 a 50 dBZ | J.m ⁻¹ .s ⁻¹ |
| SHI 45-55 dBZ | index nebezpečných krup – teplotně a odrazivostí vážený integrál odrazivosti s parametry odrazivosti 45 a 55 dBZ | J.m ⁻¹ .s ⁻¹ |
| POSH 40-50 dBZ | pravděpodobnost nebezpečných krup – teplotně vážený SHI 40-50 dBZ | % |
| POSH 45-55 dBZ | pravděpodobnost nebezpečných krup – teplotně vážený SHI 45-55 dBZ | % |
| Waldv. 45 dBZ | Waldvogelovo kritérium – rozdíl výšky nulové izotermy a maximální výšky 45 dBZ | m |
| Waldv. >45 dBZ | Waldvogelovo kritérium – rozdíl výšky nulové izotermy a maximální výšky určité hodnoty radarové odrazivosti | m |

6. Vstupní data

Metody pro detekci krup pomocí radarových dat, která jsou popsána v kapitole 6, jsem testovala pro vybrané události s výskytem krupobití na území Česka od roku 2002. Použila jsem radarové informace z české radarové sítě CZRAD a doplňkové informace z aerologických sondáží v Praze-Libuši.

6.1 Případy krupobití

Události s krupobitím pro testování metod detekce jsem shromáždila z různých zdrojů. Hledala jsem v databázi ESWD (evropská databáze nebezpečných meteorologických jevů, www.essl.org/eswd), na stránkách věnujících se tornádům v Česku (www.chmi.eu/torn), mezi informacemi o krupobití v novinách a také jsem získala informace od očitých svědků a z údajů o pojistných škodách. Velká část nalezených událostí byla potvrzena i v záznamech o význačném počasí na stránkách ČHMÚ (old.chmi.cz/meteo/om/prubeh/vyzpoc). Celkem jsem použila 25 dní s výskytem krupobití z letních částí let 2002 až 2011 (tab. 6.1). Jednalo se o krupobití, která upoutala pozornost a způsobila významné škody. Průměr krup většinou dosahoval nad 3cm.

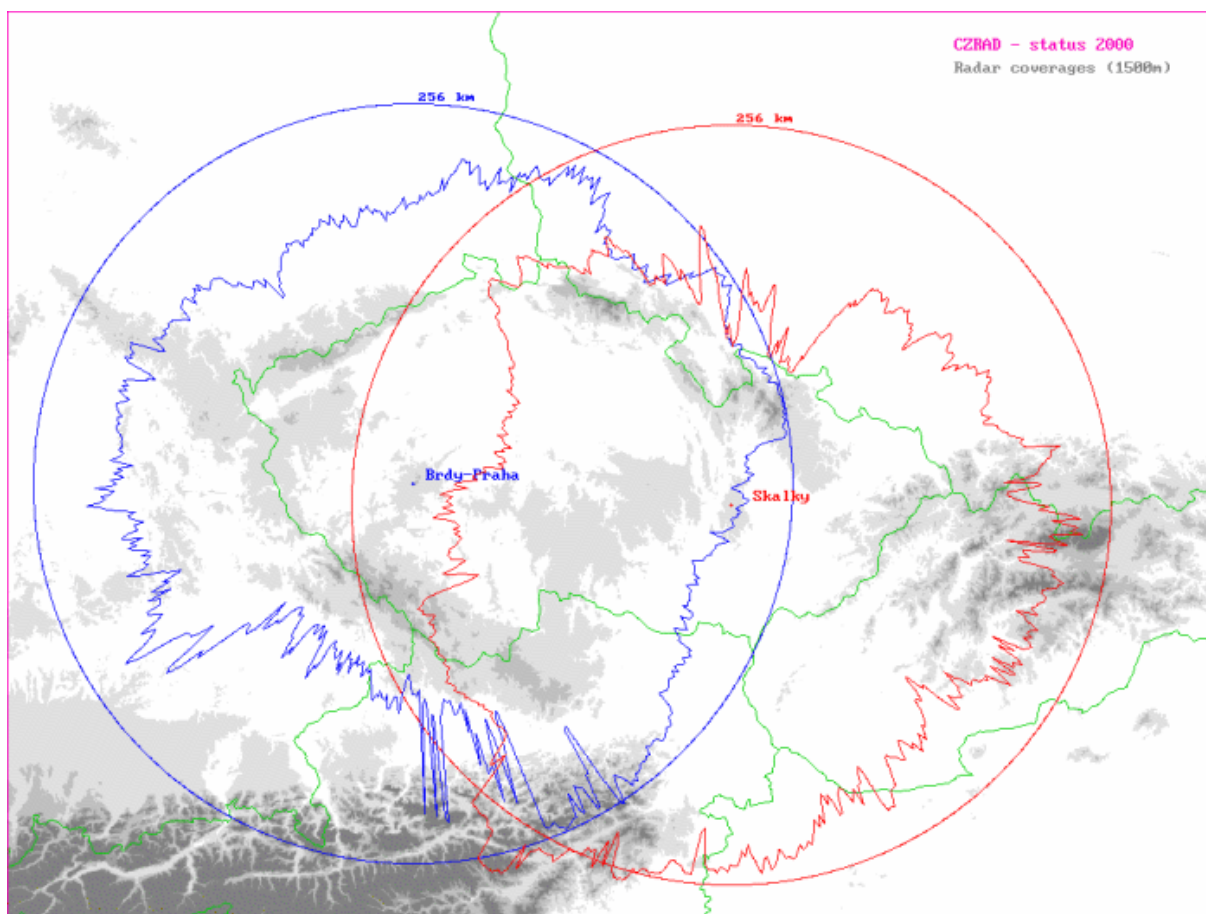
6.2 Radarová data

Česká radarová síť CZRAD sestává ze dvou dopplerovských meteorologických radarů, pracujících v pásmu C (Novák, 2007). Provozuje je Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) a pokrývají celé území republiky. Tyto dva radary společně zajišťují měření pro potřeby civilní a armádní hydrometeorologické služby od roku 2000.

Radiolokační stanice Skalky se nachází na střední Moravě na rozmezí okresů Blansko a Prostějov poblíž kóty Skalky, nejvyššího vrcholu Dražanské vrchoviny, v nadmořské výšce 730 metrů. Jedná se o meteorologický radar německé firmy Gematronik Meteor 360 AC, který pracuje na vlnové délce 5,3 cm, a je řešen jako dopplerovský impulzní primární radiolokátor. Operativní provoz byl zahájen v roce 1996.

Radiolokační stanice Brdy je umístěna ve středních Čechách ve vojenském újezdu Brdy (Vojenský výcvikový prostor Jince) na plochem vrcholku kopce Praha v nadmořské výšce 860 metrů. Operativní provoz byl spuštěn 1. ledna 2000 a data z radaru Brdy tak nahradila data z radaru Libuš. Pro radar Brdy byl vybrán radiolokační systém od firmy Enterprise Electronics Corporation z USA DWSR-2501C s digitálním přijímačem EDPP-8. Tento přístroj,

určený především pro provoz v mírných zeměpisných šířkách, také pracuje v pásmu C (vlnová délka 5,3 cm, frekvence 5,6 GHz).



Obr. 6.1 Pokrytí území ČR radary ČHMÚ. Převzato z http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html [24. 1. 2012].

Používala jsem produkty pseudoCAPPI 1 až 20 km s vertikálním krokem 0,5 km sloučené z radarů Brdy a Skalky. Horizontální rozlišení dat je 1 km. Časový krok dat byl do roku 2006 10 minut a od roku 2007 5 minut. K dispozici jsem měla radarová data pro vybrané dny s výskytem krupobití v letech 2002 až 2011.

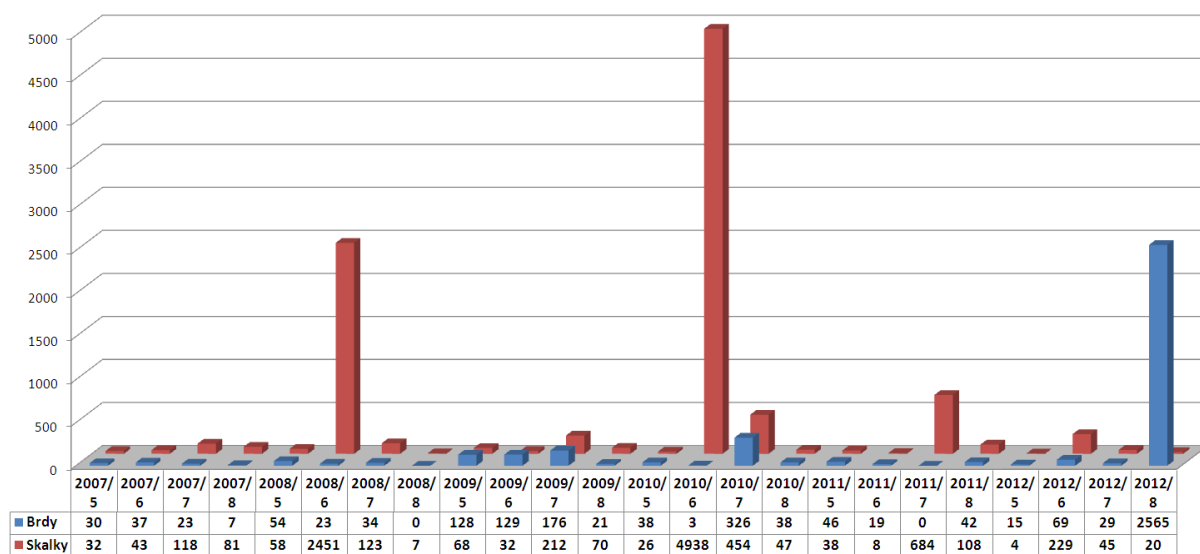
Pro účely studia klimatologie kroupových kritérií mi byla radarovým oddělením ČHMÚ poskytnuta data z let 2007 až 2012, vždy pro měsíce květen až srpen. Stejně jako při testování kritérií jsem měla k dispozici produkty pseudoCAPPI sloučené z obou radarů s horizontálním rozlišením 1km, vertikálním krokem 500m a časovým krokem 5 minut. Tento rozsáhlý datový soubor vyžadoval předzpracování pro zjištění množství chybějících měření.

Tab. 6.1 Parametry meteorologických radarů ČHMÚ. Podle http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html [24. 1. 2012].

| | | |
|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Stanoviště | Skalky u Protivanova | Brdy – Praha |
| Oblast | střední Morava | střední Čechy |
| WMO indikativ | 11718 | 11480 |
| Zeměpisná šířka | 49,501 N | 49,658 N |
| Zeměpisná délka | 16,790 E | 13,818 E |
| Nadmořská výška | 730 m | 860 m |
| Výška antény n.m. | 767 m | 916 m |
| Interval měření | 5 min. | 5 min. |
| V provozu | od 1995 (2006/7 upgrade) | od 2000 (2007 upgrade) |
| Výrobce | Gematronik | EEC |
| Typ radaru | Gematronik METEOR 360AC | EEC DWSR-2501 C |
| Frekvenční pásmo | C | C |
| Dopplerovský mód | ano | Ano |
| <i>Anténa:</i> | | |
| Průměr | 4,2 m | 4,27 m |
| Šířka svazku | 0,8° | 0,96° |
| Zisk | 44 dB | 45 dB |
| Polarizace | lin. horizontální | lin. horizontální |
| <i>Vysílač:</i> | | |
| Vlnová délka | 5,3 cm | 5,3 cm |
| Frekvence | 5645 MHz | 5630 MHz |
| Impulsní výkon | 250 kW | 305 kW |
| Délka pulsu | 0,8 μs | 0,8 μs |
| Opakovací frekvence | 584 Hz | 584 Hz |
| <i>Přijímač:</i> | lin. – dig. | lin. – dig. |
| Min. detek. signál | -109 dBm | -110 dBm |
| Dynamický rozsah | 100 dB | 80 dB |
| Mezifrekvence | 60 MHz | 30 MHz |
| Min. detek. odrazivost | 9,7 dBZ | 10,6 dBZ |
| v max vzdálenosti | 260 km | 256 km |

V datech se nevyskytl den, kdy by současně chyběla všechna měření obou radarů.

Ve studovaných šesti letech se vyskytly dvě období s delším výpadkem měření radaru Skalky, konkrétně šlo o červen 2008 (6 celých dní a 5 částečně) a červen 2010 (16 celých dní a 2 částečně) a jedno období v srpnu 2012 s delším výpadkem měření radaru Brdy (6 celých dní a 3 téměř celé). Ostatní výpadky měření byly spíše krátkodobé. Pouze ve třech krátkých časových úsecích chybějí data z obou radarů současně, jedná se o tři po sobě následující termíny v ranních hodinách dne 14. 6. 2010, pět termínů v průběhu dne 22. 7 2012 a dvacet termínů ve večerních hodinách dne 19. 8. 2012. V případě absence dat z jednoho radaru pokrývají data z druhého radaru stále většinu území Česka. Proto jsem nevyřadila žádný den pro nedostatek dat. Přehled chybějících dat je v grafu (obr. 6.2).



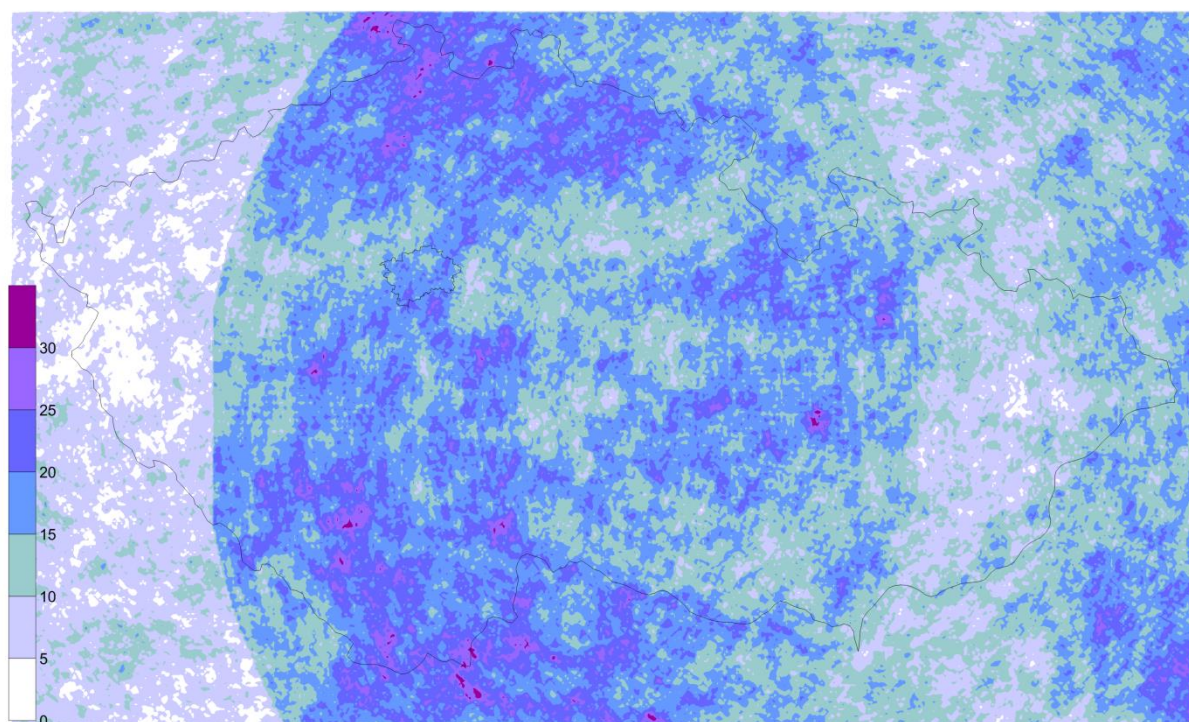
Obr. 6.2 Počty termínů v jednotlivých měsících, kdy měření radaru nebylo k dispozici.

Ve druhém kroku přípravy dat bylo nutné vyřadit termíny s chybami v měření. Původní data byla ošetřena na chyby způsobené rušením od wi-fi vysílačů, ale přesto zůstaly v datech některé chyby silně ovlivňující výsledky klimatologie. Jednalo se o krátkodobý výskyt velmi vysokých odrazivostí, často na velké ploše, bohužel často zasahující do více CAPPI hladin. Zvolila jsem práh 69 dBZ, při jehož překročení vyřazuji z dalších výpočtů dotčený termín.

Na výstupy počítané z radarových dat mají vliv i další efekty vznikající při převodech naměřených radarových dat na používané datové produkty. Výpočty jsem prováděla z dat ve formě pseudoCAPPI. To znamená, že původní objemová radarová data se ze sférických souřadnic (PPI) převádí do kartézských souřadnic. Pole odrazivosti v hladině konstantní nadmořské výšky se získávají interpolací ze sousedních hladin PPI. Ve větších vzdálenostech od radaru se pak nízké hladiny vyskytují v oblasti, kam radar „nevidí“, a nelze tedy interpolovat mezi sousedními hladinami PPI. Pak je použita odrazivost z nejnižší hladiny PPI a mluví se o pseudoCAPPI. Podobně radar „nevidí“ do oblastí přímo nad svou pozicí. V pseudoCAPPI produktu se pak uplatňují nejbližší naměřená data. A těmi mohou být i pozemní odrazy, které se často vyskytují v blízkosti radaru. Radarový paprsek může zasáhnout vrcholky stromů a zaznamenat tak vysokou odrazivost právě v okolí radaru. Více se tento efekt projevuje u radaru Skalky, který je umístěn níže a od východu je stíněn stromy.

Dále zmíním problémy způsobené používáním sloučené informace ze dvou radarů české radarové sítě. Oblasti měření dvou radarů české radarové sítě se překrývají na většině území Česka. Ve sloučené informaci se pak uplatňují vyšší hodnoty odrazivosti. Radary jsou

stejného typu a byly prováděny úpravy nastavení tak, aby měřily stejně. Přesto se ale jedná o dva různé přístroje a malé odchylky se mohou vyskytnout. Rozdíly se projeví zejména v oblasti na okraji dosahu jednoho z radarů. Ve velké vzdálenosti od radaru se od sebe vzdalují jednotlivé elevace, na kterých k měření dochází, a rozšiřuje se parsek. Pro výslednou hodnotu odrazivosti dochází k průměrování přes větší oblast, než pro bližší radar. Může dojít k tomu, že vzdálenější radar naměří vyšší hodnoty než bližší radar a za hranicí dosahu vzdálenějšího radaru dochází ke skoku v hodnotách odrazivosti. Při znázornění maximálních odrazivostí ve výšce za delší období se tento efekt výrazně projeví (obr. 6.3). Algoritmy pro detekci krup používající vertikální rozložení odrazivosti, jako je hojně používaný algoritmus podle Waldvogela (HDA), jsou velice citlivé na malé změny naměřené odrazivosti kolem prahové hodnoty (45 dBZ).



Obr. 6.3 Počty dní s odrazivostí nad 45 dBZ ve výšce nad 5 km za květen až srpen 2007 až 2012.

Delobbe a Holleman (2006) dokumentovali snižující se schopnost HDA se zvyšující se vzdáleností od radaru. Porovnávali výsledky z nizozemského a belgického radaru, které jsou od sebe vzdáleny 240 km. Při detekování nejvyšších hladin výskytu prahové hodnoty odrazivosti dochází k chybám jak v samotné naměřené odrazivosti, tak ve výšce, která je této hodnotě přiřazena. K velkému nadhodnocení výšky prahové odrazivosti tak podle autorů může dojít ve velké vzdálenosti od radaru, pokud jsou ve vertikálním profilu odrazivosti velké gradienty. Největší nesrovnalosti mezi výškami maximální odrazivosti ze dvou radarů jsou

podle studie (Delobbe a Holleman, 2006) způsobeny „overshootingem“, tedy jevem, kdy ve větší vzdálenosti od radaru není možné detekovat cíle v nízkých hladinách.

6.3 Informace z aerologických sondáží

Do některých algoritmů pro detekci krup vstupují informace o teplotním zvrstvení atmosféry, zejména výška nulové izotermy a výška izotermy -20°C . Tato data jsem získávala z aerologických sondáží. Při testování metod na konkrétních případech krupobití jsem vybírala sondážní stanici nejbližší nebo nejvhodněji umístěnou vzhledem k dokumentovanému výskytu krupobití. Volila jsem mezi stanicemi Praha-Libuš, Prostějov, Vídeň a Kümmersbrück. Při porovnání hodnot z různých stanic pro stejný den se ukázalo, že rozdíly nejsou velké. V některých případech také nebylo jasné, kterou stanicí zvolit. Proto jsem pro zjednodušení dále používala pouze hodnoty z aerologických sondáží v Praze-Libuši, a to vždy z poledního výstupu.

Tab. 6.2 Případy s výskytem krupobití.

| | datum | místo | výška 0°C | výška -20°C | CAPE |
|----|-----------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|------|
| 1 | 23.6.2002 | Brno | 4158 | 7252 | 3441 |
| 2 | 10.7.2002 | Klatovsko | 4093 | 7069 | 3622 |
| 3 | 22.7.2003 | Otrokovice | 3856 | 6816 | 1545 |
| 4 | 23.7.2003 | Karlovarsko | 3387 | 6467 | 2008 |
| 5 | 23.5.2005 | Pelhřimov | 3083 | 6136 | 933 |
| 6 | 30.5.2005 | Praha | 3752 | 7049 | 2934 |
| 7 | 30.7.2005 | Soběslav | 3990 | 7094 | 609 |
| 8 | 21.6.2006 | Střední Čechy | 3746 | 6978 | 2484 |
| 9 | 25.6.2006 | Strakonice | 4005 | 7311 | 2958 |
| 10 | 12.7.2006 | Vodňansko | 3965 | 7177 | 1420 |
| 11 | 14.5.2007 | Liberecko | 3365 | 6253 | 534 |
| 12 | 25.5.2007 | Sušicko | 3757 | 6729 | 1053 |
| 13 | 21.6.2007 | Kroměříž | 3865 | 6912 | 665 |
| 14 | 23.8.2007 | Písek | 3573 | 7135 | 485 |
| 15 | 1.6.2008 | Praha-východ | 3487 | 6666 | 3690 |
| 16 | 25.6.2008 | Praha-severovýchod | 4013 | 7021 | 1219 |
| 17 | 3.7.2008 | Počátky | 3826 | 7256 | 3255 |
| 18 | 9.6.2009 | Znojensko | 2986 | 6412 | 1709 |
| 19 | 2.8.2009 | Milevsko | 3847 | 7010 | 438 |
| 20 | 12.6.2010 | Vysočina | 3766 | 7088 | 952 |
| 21 | 15.8.2010 | Praha | 3860 | 7089 | 2004 |
| 22 | 22.6.2011 | Mladá Boleslav | 3759 | 6871 | 1162 |
| 23 | 7.7.2011 | Ostrava-Poruba | 3383 | 6979 | 91 |
| 24 | 19.8.2011 | Plzeň | 3918 | 7257 | 2559 |
| 25 | 24.8.2011 | Vysočina, Příbrav | 4025 | 7099 | 1694 |

7. Prahové hodnoty pro detekci krup

V literatuře lze nalézt ke studovaným algoritmům detekce krup prahové hodnoty vhodné pro identifikaci krup. Vývoj a testování metod však probíhalo v různých částech světa a za použití radarů pracujících na různých vlnových délkách. Bylo proto potřeba testovat a upravovat metody tak, aby pracovaly co nejlépe na území Česka s daty z české radarové sítě. K testování jsem použila 25 dobře doložených případů krupobití v Česku z let 2002 až 2011 (viz tab. 6.2). V prvním kroku jsem vybrala přibližný rozsah prahů pro jednotlivé metody podle hodnot uvedených v literatuře a také podle výsledků testovaných algoritmů pro 25 případů krupobití na území Česka. Hledala jsem takovou prahovou hodnotu pro každý algoritmus, aby v každém z 25 dnů s krupobitím v oblasti s dokumentovaným krupobitím existoval alespoň jeden pixel, ve kterém je kritérium dané prahovou hodnotou splněno.

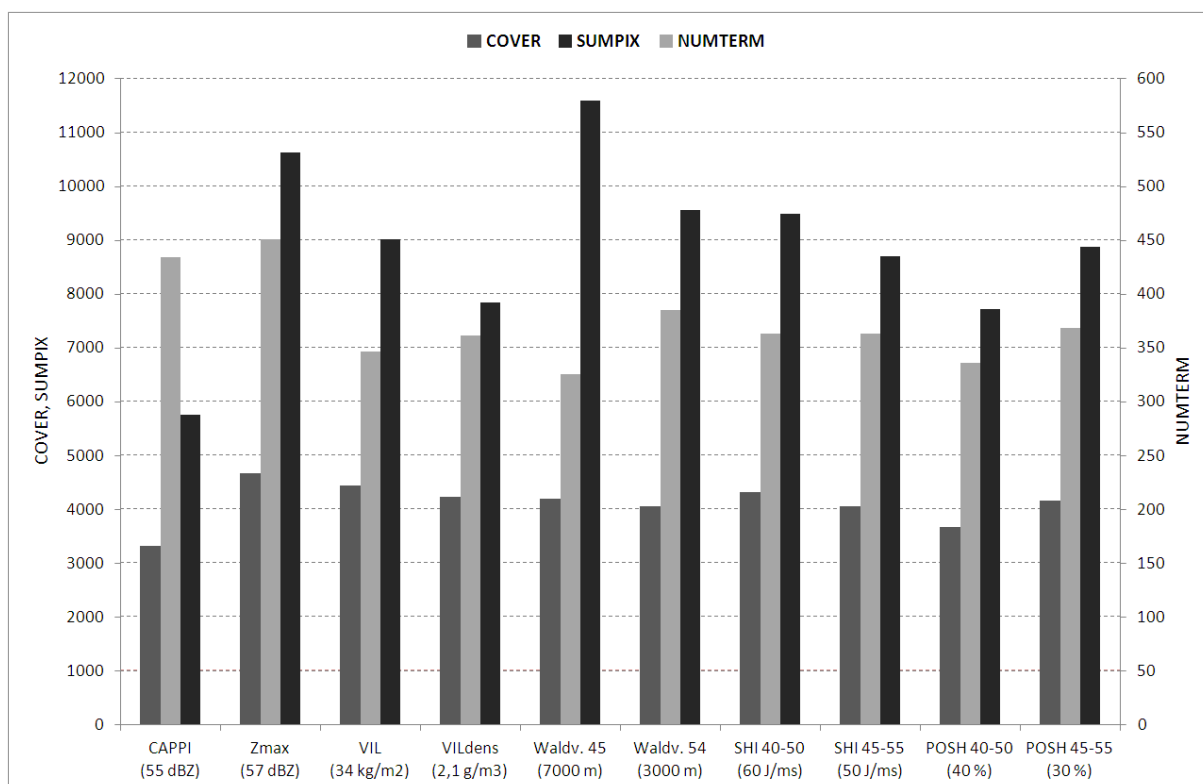
Při dalším testování metod pro detekci krup jsem hledala takové prahové hodnoty pro jednotlivé metody, aby se projevy výsledných kritérií co nejvíce podobaly. Definovala jsem tři parametry reprezentující četnost výskytu krup na základě studovaných metod (viz definice v kapitole 7.1) a porovnávala jejich hodnoty při různých prahových hodnotách. Sledovala jsem počty pixelů, ve kterých bylo kritérium splněno, jak z hlediska pokrytí plochy za celý den, tak celkové sumy pixelů za den. Třetím parametrem pak byl počet termínů, ve kterých bylo kritérium splněno.

7.1 Kroupová kritéria

Testované metody pro detekci krup z radarových dat jsou při vlastní aplikaci reprezentovány algoritmy pro výpočet určité veličiny či pravděpodobnosti. Zvolením konkrétní prahové hodnoty se z metody stává kritérium jasně rozlišující výsledek indikující výskyt krup a výsledek, který kroupy nedetekuje. Při testování mnoha prahových hodnot jsem hledala kritéria nejlépe detekující kroupy dopadající k zemi. Možnosti verifikace pro nalezené kroupové události v Česku však byly omezené. Charakter informací k jednotlivým událostem se různil, místní i časová určení událostí byla často spíše orientační. Pro každou událost však na základě dostupných informací bylo možné zvolit oblast 40x40 km kolem udávaného místa výskytu a období 4 hodin zahrnující čas výskytu. Dále jsem data o každé události zpracovávala z tohoto prostorového a časového okna.

Pro posouzení chování kroupových kritérií jsem definovala tři parametry. Jako první parametr jsem zvolila celkový počet pixelů detekujících kroupy v daném časoprostorovém okně (SUMPIX). Druhým parametrem je pokrytí oblasti s krupobitím pixely detekujícími kroupy, každý pixel ve sledované oblasti se tedy počítá pouze jednou, i když jsou v něm kroupy detekovány více než v jednom termínu (COVER). A třetím parametrem je počet termínů s výskytem alespoň jednoho pixelu detekujícím kroupy (NUMTERM). Hledala jsem pak takové prahové hodnoty pro testované metody, aby hodnoty parametrů byly co možná nejbližší pro všechny metody navzájem.

Pro každé z deseti testovaných kritérií (CAPPI, Zmax, VIL, VIL_{dens}, SHI 40-50, SHI 45-55, POSH 40-50, POSH 45-55, Waldv. 45, Waldv. 54) jsem zvolila 6 prahových hodnot, pro něž jsem spočítala odpovídající hodnoty parametrů SUMPIX, COVER a NUMTERM. Pro každý testovaný algoritmus a pro každý ze tří parametrů jsem spočetla sumu hodnot přes všech 25 testovaných událostí. Vzniklo tak 3x60 sumárních hodnot parametrů, které charakterizovaly výsledky každého testovaného algoritmu pro celý soubor událostí. Pro všechny kombinace deseti algoritmů a šesti příslušných prahových hodnot jsem vytvářela „desetice“, zvláště pro hodnoty SUMPIX, COVER a NUMTERM. V každé desetici byl každý testovaný algoritmus zastoupen právě jednou ze šesti prahových hodnot. Mezi deseticemi jsem hledala takovou kombinaci prahových hodnot, aby hodnoty parametrů (COVER, SUMPIX a NUMTERM) pro jednotlivá kritéria měla co nejbližší hodnoty. Pro posouzení blízkosti hodnot parametrů jsem použila jejich rozptyl a střední absolutní odchylku. Získala jsem tak 6 návrhů vhodných prahových hodnot pro každý z deseti algoritmů: 3 parametry (COVER, SUMPIX a NUMTERM) krát 2 míry rozptylu (rozptyl, střední absolutní odchylka). Z těchto návrhů jsem vybrala nejvhodnější prahovou hodnotu pro každý algoritmus. Hodnoty COVER, SUMPIX a NUMTERM jsou znázorněny v grafu na obr. 7.1, již za použití vybrané prahové hodnoty pro každé z deseti kritérií.



Obr. 7.1 Sumy celkového počtu pixelů (COVER), pokrytí (SUMPIX) a počtu termínů (NUMTERM) přes 25 událostí pro nalezené optimální prahové hodnoty testovaných kritérií. Sumy jsou přes oblast 40x40 km a časový úsek 4 hodiny kolem výskytu kroupové události.

8. Testování vybraných metod na datech z Karlsruhe (Německo)

Během pětíměsíčního stipendijního pobytu (duben až srpen 2011) ve výzkumném centru univerzity v Karlsruhe v Německu (Karlsruher Institut für Technologie) jsem pokračovala v testování metod identifikace krup meteorologickými radary. Byl mi umožněn přístup k místním radarovým datům a informacím o událostech s krupobitím. Soustředila jsem se na hledání vhodných prahových hodnot pro vybrané metody detekce krup. K verifikaci jsem použila informace o poškození budov krupobitím od místní pojišťovací společnosti.

8.1 Používaná data

Při testování metod pro rozpoznání krup jsem používala předně radarová data z měření dopplerovského C-band radaru IMK. U některých metod vstupují do výpočtu další hodnoty, které jsem získala z aerologických sondáží ve Stuttgartu. Pro výběr dnů s krupobitím a verifikaci počítaných metod bylo zapotřebí získat informace o kroupových událostech v zájmovém území. Tyto informace jsem získala kombinací několika zdrojů, zvláště ze zaznamenaných škod na budovách pojištěných u SV-Sparkassenversicherung.

8.1.1 Radar IMK

Během pobytu v Karlsruhe mi byl umožněn přístup k objemovým datům naměřeným místním radarem. V celém období s vybranými kroupovými událostmi 2002 až 2010 je objemový produkt s radarovou odrazivostí k dispozici každých pět minut. Malou komplikací bylo časové přiřazení, protože v roce 2007 byl proveden přechod od SEČ k UTC. Pro samotné výpočty jsem převáděla objemová data na CAPPI data ve 40 hladinách s vertikálním rozlišením 0,5 km a s horizontálním rozlišením 1 km.

Radar je umístěn na střeše budovy Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) v areálu severního kampusu univerzity, asi 10 km severně od centra Karlsruhe. Jedná se o Dopplerovský radar pracující v pásmu C (Kunz a Puskeiler, 2010), tedy s vlnovou délkou 5,4 cm, od firmy Gematronik. Technické údaje jsou uvedeny v tabulce 8.1.

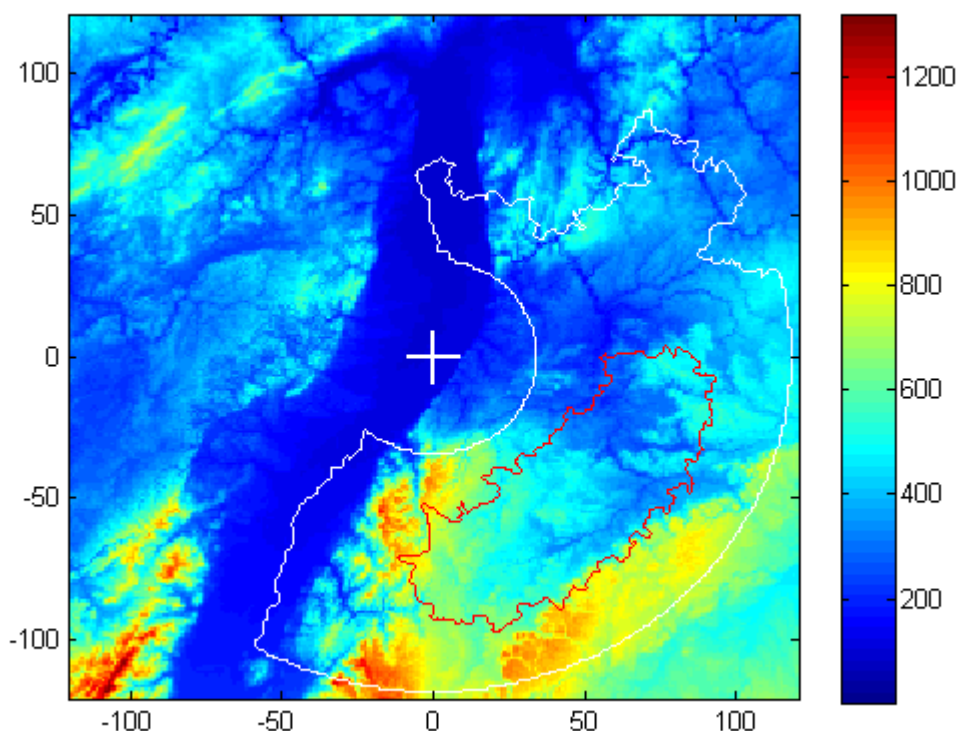
Tab. 8.1 Technické údaje k radaru IMK.

| | |
|---------------------|---|
| Typ radaru | C-Band-Doppler-Radar METEOR 360 AC |
| Výrobce | Gematronic GmbH, Neuss |
| Frekvence | 5620 MHz |
| Vlnová délka | 5,4 cm |
| Impulsní výkon | 250 kW |
| Opakovací frekvence | 250 až 1150 Hz |
| Délka pulzu | 0,85 ms (krátký pulz), 2,0 ms (dlouhý pulz) |
| Šířka svazku | 0,98° |
| Průměr antény | 4,2 m |
| Zisk antény | 44,7 dB |
| Rozsah odrazivosti | -31,5 až +95 dBZ |
| Rozlišení | 1°, 500 m |

Dosah měření radaru je 120 km, objemový produkt se skládá ze 14 elevací (0,4°, 1,1°, 2,0°, 3,0°, 4,5°, 6,0°, 7,5°, 9,0°, 11,0°, 13,0°, 16,0°, 20,0°, 24,0°, 30,0°) a je naměřen každých 5 minut.

Radar svým měřením pokrývá severozápadní část Bádenska-Württemberska, jihovýchodní část spolkového státu Porýní-Falc a výběžek Francie. Pro verifikaci kroupových událostí jsem používala data z pojistných událostí pouze na území Bádenska-Württemberska, proto je jeho část v dosahu radaru zájmovým územím této práce.

Uvažovala jsem tzv. hluchý kužel (cone of silence), oblast přímo nad anténou radaru, kam radar „nevidí“ (Billet et al., 1997). Proto jsem při verifikaci vynechala oblast kolem radaru s poloměrem 30 kilometrů.



Obr. 8.1 Zájmová oblast verifikace dat vymezená dosahem radaru IMK, oblastí hluchého kužele nad radarem a hranicemi Bádenska-Württemberska - vyznačena bílou čarou. Červenou čarou zmenšená zájmová oblast okolí Stuttgartu.

Zájmové území je členěno do několika geografických regionů. Rheintal (Porýní): Oberrheintal (Horní Porýní) je nejnižším regionem zájmové oblasti. Nadmořská výška se zde pohybuje mezi 300 m n.m. na jihu a méně než 100 m n.m. na severu. Kromě rozlehlých lesů zde nalezneme pole a v okrajových částech vinice. Západní hranici zájmového území tvoří řeka Rýn. Nordschwarzwald (severní Schwarzwald): Nordschwarzwald se nachází východně od Porýní. Oblast z většiny pokrývají lesy. Údolí se hluboce zařezávají, nejvyšší vrcholy dosahují téměř 1200 m n.m. Kraichgau: Kraichgau se rozprostírá severně od Schwarzwaldu v nadmořských výškách kolem 250 m. Krajina je zvlněná, převážně s poli. Odenwald: V severním Bádensku-Württembersku na hranicích s Hesenskem a Bavorskem se nachází Odenwald. Vrcholky zde dosahují 600 m n.m. a oblast je z velké části zalesněna. Hohenloher Ebene: Hohenložská planina se rozprostírá v severovýchodní části zájmového území ve výškách kolem 400 m n.m. Mírně zvlněná krajina je tu pokryta zejména poli a loukami. Schwäbische Alb (Švábská Jura): Jižní a jihovýchodní hranici pozorovaného území tvoří Schwäbische Alb. Jedná se o horský hřeben táhnoucí se skrz Bádensko-Württembersko ve

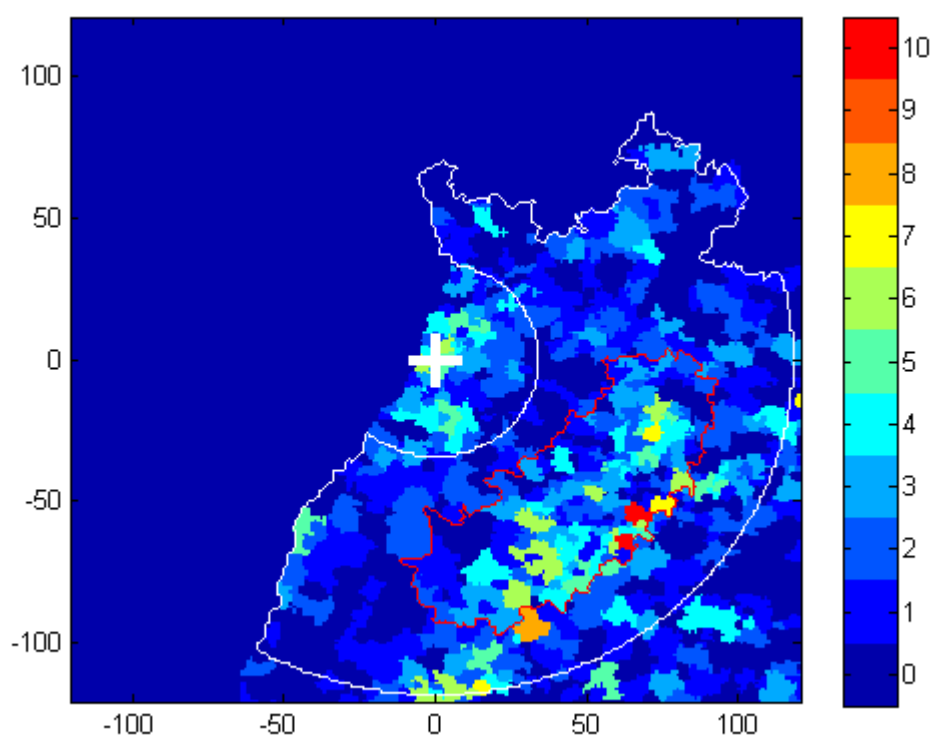
směru severovýchod – jihozápad. Strmá severozápadní hrana dosahuje ve východní části výšek až 700 m n.m., v západní pak téměř 1000 m n.m. K jihu spadá Jura pozvolně do údolí Dunaje. Severozápadní hrana je většinou zalesněna, na zvlněných náhorních planinách nalezneme také pole. Albvorland / Neckartal: Tento trojúhelník sevřený mezi Schwarzwaldem a Schwäbische Alb částečně zalesněný a částečně zemědělsky využívaný dosahuje v západní části nadmořských výšek nad 600 m n.m., ve východní části pak nad 300 m n.m. Nápadné je zde údolí řeky Neckar, které je nejdříve hluboce zařiznuté ve Schwarzwaldu a poté se k východu stává plochým.

8.1.2 Události s krupobitím

Informace o krupobitích v dosahu měření radaru IMK jsem začala nejdříve shromažďovat ze záznamů firmy RadarInfo (firma související s provozováním radaru IMK) a z volně dostupné databáze European Severe Storm Laboratory. Posléze se ukázalo jako vhodné použít informace o škodách způsobených na budovách krupobitím, které měl k dispozici Dr. Michael Kunz, a původně nalezené případy použít jako doplňující informace. V Bádensku-Württembersku bylo do roku 1994 pojištění budov povinné a poskytovala ho exkluzivně Gebäudeversicherung Baden-Württemberg. Nástupcem se stala SV-Sparkassenversicherung, která v současnosti pojišťuje kolem 65% z původního množství kontraktů.

Události plnění škod jsou místně příslušné podle pětimístního poštovního směrovacího čísla (PLZ). V zájmové oblasti se nachází 753 PLZ a typická velikost oblasti s daným PLZ je 25 km². Nevýhodou těchto informací je časové určení událostí, které udává pouze den, nikoliv hodinu. Podle celkových denních sum škod způsobených kroupami jsem vytipovala dny v období let 2002 až 2010 s nejvyššími sumami škod, a ve kterých se vyskytovaly vysoké hodnoty radarové odrazivosti v dosahu radaru IMK. Na základě tohoto předvýběru mi byly poskytnuty záznamy o krupobitních škodách a jejich lokalizaci podle PLZ pro 35 dní ve zmiňovaném časovém období. Jsou používány pouze oblasti s PLZ, kde byly alespoň tři vyplacené škody, každá nejméně v hodnotě 100€ (což je spoluúčást pojistníka). Data o škodách způsobených krupobitím obsahují informaci o velikosti škody pro každou zasaženou poštovní oblast v podobě tzv. četnosti škod. V této informaci je vyjádřen počet budov poškozených krupobitím relativně k počtu pojištěných budov v poštovní oblasti.

Během testování metod pro detekci krup na území Bádenska-Württemberska se ukázalo jako vhodné zvolit druhou, menší, zájmovou oblast. Druhá zájmová oblast je vymezena v okolí Stuttgartu, přibližně ve vzdálenosti 60 až 90 km od radaru (obr. 8.2). Při testování metod na této zmenšené oblasti jsem použila 25 dní, kdy se škody na budovách způsobené krupobitím vyskytly právě zde.



Obr. 8.2 Počty dní s pojistnými krupobitními škodami v jednotlivých poštovních oblastech z vybraných 35 dní se škodami.

8.1.3 Informace z aerologických sondáží

Pro výpočet některých kroupových kritérií jsou kromě radarových informací potřebná ještě další data, kterými jsou výška nulové izotermy a výška hladiny -20°C . Tyto údaje jsem získala z aerologických sondáží ve Stuttgartu. Používala jsem vždy hodnoty naměřené při poledním výstupu, a to pro celý den a celou zájmovou oblast.

Tab. 8.2 Přehled dnů s výskytem krupobití v zájmové oblasti.

| | Datum | h(0°C) | h(-20°C) | CAPE | Celkové škody v € | Průměrná četnost | |
|----|----------|--------|----------|------|------------------------------|--------------------|---------------------|
| | | | | | (korigováno) | škod v | |
| | | | | | v Bádensku- Württembersku | zájmové oblasti | okolí Stuttgartu |
| 1 | 20100609 | 3515 | 6977 | 2045 | 2 048 443 | 0,977 | 0,815 |
| 2 | 20100526 | 2901 | 6142 | 217 | 2 566 011 | 2,151 | 0,765 |
| 3 | 20090723 | 3840 | 7030 | 392 | 1 170 014 | 0,758 | 0,072 |
| 4 | 20090521 | 3112 | 6248 | 1745 | 4 709 803 | 2,004 | 2,119 |
| 5 | 20090512 | 2898 | 5906 | 73 | 1 445 066 | 1,998 | 1,845 |
| 6 | 20090511 | 2876 | 5886 | 1457 | 2 575 417 | 0,691 | 0,505 |
| 7 | 20090509 | 2945 | 5987 | 822 | 670 809 | 1,230 | 0,268 |
| 8 | 20080807 | 4009 | 6764 | 821 | 2 402 796 | 4,562 | 0,328 |
| 9 | 20080729 | 3751 | 7002 | 1532 | 1 127 101 | 2,310 | 2,820 |
| 10 | 20080728 | 3893 | 6846 | 379 | 542 740 | 0,271 | 0,126 |
| 11 | 20080711 | 3644 | 6789 | 1017 | 1 940 022 | 1,921 | 2,217 |
| 12 | 20080623 | 3795 | 6852 | 1298 | 4 617 886 | 3,258 | 0,215 |
| 13 | 20080602 | 3679 | 6550 | 1889 | 2 927 002 | 0,719 | 0,881 |
| 14 | 20080530 | 3489 | 6361 | 2140 | 55 295 290 | 5,086 | 6,050 |
| 15 | 20080529 | 4005 | 6850 | 2461 | 730 228 | 1,449 | 0,281 |
| 16 | 20070720 | 3718 | 7113 | 2146 | 13 966 650 | 5,493 | 7,138 |
| 17 | 20070614 | 3295 | 6587 | 937 | 1 086 542 | 1,468 | 0,372 |
| 18 | 20060907 | 3950 | 7138 | 1262 | 395 784 | 0,108 | 0,108 |
| 19 | 20060705 | 3848 | 6892 | 751 | 772 368 | 0,380 | 0,238 |
| 20 | 20060628 | 3411 | 6550 | 836 | 219 101 939 | 15,737 | 1,529 |
| 21 | 20060625 | 3876 | 7068 | 1103 | 3 328 388 | 0,382 | 0,482 |
| 22 | 20050729 | 4294 | 7256 | 1866 | 47 597 646 | 3,073 | 3,531 |
| 23 | 20050629 | 3712 | 7173 | 2004 | 1 065 686 | 0,360 | 0,303 |
| 24 | 20050625 | 3855 | 7293 | 972 | 2 112 392 | 1,966 | 2,028 |
| 25 | 20040812 | 4414 | 7240 | 1662 | 3 050 787 | 1,339 | 1,423 |
| 26 | 20040610 | 3590 | 6938 | 1102 | 1 782 761 | 2,196 | 3,648 |
| 27 | 20030722 | 3454 | 6813 | 1931 | 5 277 494 | 4,800 | 8,053 |
| 28 | 20030716 | 4022 | 7071 | 1633 | 2 192 570 | 3,856 | 0,442 |
| 29 | 20030614 | 3800 | 7002 | 2998 | 7 055 225 | 3,307 | 3,580 |
| 30 | 20030612 | 4008 | 7271 | 3547 | 393 165 | 0,551 | 0,188 |
| 31 | 20030531 | 3300 | 6413 | 2169 | 7 548 562 | 3,497 | 4,176 |
| 32 | 20020623 | 4193 | 7161 | 696 | 6 438 329 | 2,091 | 2,344 |
| 33 | 20020621 | 3676 | 6965 | 2040 | 11 087 604 | 3,515 | 4,031 |
| 34 | 20020620 | 3965 | 6948 | 2580 | 44 279 531 | 4,872 | 0,307 |
| 35 | 20020619 | 4002 | 7213 | 2851 | 4 733 961 | 0,611 | 0,579 |

8.2 Krupobitní ohrožení v zájmové oblasti

Velký počet studií o ohrožení krupobitím a o detekci krupobití pomocí meteorologických radarů pochází ze Švýcarska (např. Hohl et al., 2002a,b; Schiesser, 1990). Model pojišťovací společnosti Swiss Re HailCalc klasifikuje území střední Evropy do pěti kategorií podle stupně ohrožení krupobitím. Území jižního Německa zde spadá stejně jako například severní Itálie a jihozápadní Francie do kategorie nejvyššího ohrožení.

Krupobitním rizikem přímo v zájmové oblasti severozápadního Bádenska-Württemberska se zabýval Puskeiler (2009). Na základě radarových dat a krupobitních škod na budovách vytvořil mapu ohrožení krupobitím. V pětistupňové škále se ukázala jako nejvíce ohrožená oblast okolí Stuttgartu. Zvýšené nebezpečí krupobití se objevilo také v oblasti Kraichgau (okolí Karlsruhe), zatímco Schwarzwald vykazuje nízké ohrožení krupobitím. Puskeiler se zabýval také pruhy souvisle zasaženými krupobitím (Zugbahnen/hailstreaks). Většina kroupových pruhů probíhala od jihozápadu k severovýchodu, což je zde převládající směr větru. Částečně lze v průběhu krupobitních pruhů rozeznat vliv orografie. Mnoho bouří se zesiluje teprve na východní straně Schwarzwaldu, jejich dráhy pak často pokračují paralelně s hranou Švábské Jury. Naopak zřídka vystupují kroupové bouře na náhorní rovinu Jury. Možným vysvětlením je obtékání Schwarzwaldu při jihozápadním proudění a tomu odpovídající konvergence na závětrné straně. Také odklon proudění výraznou hranou Švábské Jury může ovlivňovat tvar kroupového pruhu.

8.3 Způsob testování a verifikace metod detekce krup

Tab. 8.3 Přehled prahových hodnot pro detekci krup pomocí testovaných metod. Uvedeny jsou prahové hodnoty nalezené v literatuře a získané testováním ve třech oblastech (včetně Česka).

| Metoda | Literatura | Bádensko-Württembersko | Oblast Stuttgart | Česko |
|---------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| CAPPI | 55 dBZ | 58 dBZ | 58 dBZ | 55 dBZ |
| Zmax | 55 dBZ | 60 dBZ | 60 dBZ | 57 dBZ |
| VIL | 43 kg/m ² | 45 kg/m ² | 45 kg/m ² | 34 kg/m ² |
| VIL_{dens} | 3,5 g/m ³ | 3,6 g/m ³ | 2,8 g/m ³ | 2,1 g/m ³ |
| SHI 40-50 dBZ | | 100 J/(m.s) | 100 J/(m.s) | 60 J/(m.s) |
| SHI 45-55 dBZ | | 120 J/(m.s) | 100 J/(m.s) | 50 J/(m.s) |
| POSH 40-50 dBZ | 50 % | 60 % | 50 % | 40 % |
| POSH 45-55 dBZ | | 50 % | 50 % | 30 % |
| Waldv. 45 dBZ | 5500 m | 7000 m | 7000 m | 7000 m |
| Waldv. >45 dBZ | | 3500 m pro 57 dBZ | 3500 m pro 56 dBZ | 3000 m pro 54 dBZ |
| COMBI kritérium | | | | |
| SHI 40-50 dBZ | | | 60 J/(m.s) | 60 J/(m.s) |
| POSH 45-55 dBZ | | | 50 % | 30 % |
| Waldv. >45 dBZ | | | 5500 m pro 54 dBZ | 5500 m pro 52 dBZ |

Testovala jsem sedm algoritmů popsaných v kapitole 5. Pro každou z vybraných metod jsem se snažila optimalizovat výběr prahové hodnoty. Vycházela jsem nejprve

z hodnot nalezených v literatuře (tab. 8.3). Posléze jsem hledala prahové hodnoty, při kterých alespoň jeden pixel v oblasti s krupobitím na zemském povrchu splňuje kritérium pro výskyt krup. Tím jsem získala odhad rozsahu prahových hodnot, při kterých metody skutečně detekují krupobití.

Dále jsem optimalizovala prahové hodnoty porovnáváním s údaji o poškození budov. Protože jsou informace o poškození bez bližšího časového určení, počítala jsem vždy maximální hodnoty jednotlivých algoritmů za celý den. Pro různé prahové hodnoty jsem testovala, jestli se alespoň jeden pixel s nadprahovou hodnotou nachází v poštovní oblasti (PLZ) se škodami akceptovanými pojišťovnou. Prvním krokem k verifikaci tak bylo rozdělení poštovních oblastí podle přítomnosti škod způsobených krupobitím a výskytu pixelů detekujících kroupy na základě testovaného algoritmu. Pro každou variantu algoritmu byla sestavena kontingenční tabulka (tab. 8.4), která obsahovala:

- H (hit) – počet zásahů, tj. případů, kdy testovaný algoritmus detekoval kroupy potvrzené hlášením o škodách;
- F (false alarm) – počet falešných poplachů, tj. případů, kdy testovaný algoritmus detekoval kroupy, které však nebyly potvrzeny hlášením o škodách;
- M (miss) – počet minutí, tj. případů, kdy testovaný algoritmus kroupy nedetekoval, ale byly hlášeny škody.

Tab. 8.4 Kontingenční tabulka.

| | | Pozorované krupobití | | Detekované celkem |
|--------------------------|-----|----------------------|----------|-------------------|
| | | ANO | NE | |
| Detekce z radarových dat | ANO | H | F | H+F |
| | NE | M | N | M+N |
| Pozorované celkem | | H+M | F+N | C=H+F+M+N |

Pro porovnávání algoritmů a jejich prahových hodnot jsem použila následující základní statistické charakteristiky odvozené z prvků kontingenční tabulky:

- POD (probability of detection) – pravděpodobnost detekce, $POD = H / (H + M)$,
- FAR (false alarm rate) – poměr falešných výstrah, $FAR = F / (H + F)$,
- CSI (critical success index) – index úspěšnosti, $CSI = H / (H + M + F)$,
- BIAS – míra podhodnocování/nadhodnocování, $BIAS = (H + F) / (H + M)$.

Data o škodách způsobených kroupami na budovách od jedné pojišťovací společnosti samozřejmě zdaleka nejsou vyčerpávající informací o krupobití dopadajícím k zemi. Škody

tedy jen částečně reprezentují skutečný výskyt krupobití. Vliv dat chybějících k verifikaci na rozdělení do tříd podle zásahu a hlášení je možné vyjádřit efektivitou (η) verifikačních dat (Holleman, 2001). Zásah pak bude $\eta \cdot H$, minutí $\eta \cdot M$ a falešný poplach $F + (1 - \eta) \cdot H$. Pravděpodobnost detekce zůstane stejná, ale ostatní parametry se zhorší: zvýší se FAR, klesne CSI a BIAS stoupne. Dále má na verifikační parametry vliv útlum radarového paprsku se zvětšující se vzdáleností od radaru, což snižuje hodnoty POD. Vliv zdánlivých parametrů jsem uvažovala při výběru zmenšené zájmové oblasti v okolí Stuttgartu (kap. 8.5). Tato oblast má menší rozpětí ploch poštovních oblastí, předpokládám zde díky hustotě zalidnění menší počet nedokumentovaných kroupových událostí a vyskytuje se ve střední vzdálenosti od radaru.

Pro každé kritérium jsem počítala výše uvedené statistické veličiny pro různé prahové hodnoty a hledala, kdy jsou nejpříznivější. Vzhledem k povaze dat jsem hledala, kdy se při dané prahové hodnotě nachází alespoň jeden pixel za celý den detekující kroupy v poštovní oblasti (PLZ) se škodami. To s sebou přináší nepřesnosti, protože neznám přesnější určení výskytu krupobití. Velikost poštovních oblastí se různí podle hustoty obydlení, takže poštovní oblasti ve Schwarzwaldy mají větší rozlohu než ve Stuttgartu. V případě velkých rozloh poštovních oblastí je tedy větší nejistota v lokalizaci krupobitních škod.

8.4 Výsledky verifikace

Při hledání nejlepších prahových hodnot pro jednotlivá kritéria jsem vycházela z hodnot verifikačních parametrů, zejména indexu CSI. Hodnoty CSI při výpočtu přes zájmovou oblast a 35 dní s krupobitními škodami jsou poměrně nízké. Výsledky jsou však srovnatelné s hodnotami z podobných studií (Lenning et al., 1998; Holleman et al., 2000). Hodnoty verifikačních parametrů pro různé prahové hodnoty testovaných metod jsou znázorněny na obr. 8.3.

Pro kritérium CAPPI jsem jako nejlepší prahovou hodnotu našla 58 dBZ. Tedy vyšší než pro tuto metodu navrhoval Mason (1971), který pro rozlišení deště a krup udával hodnotu 55 dBZ.

Pro kritérium Zmax je optimální prahová hodnota na základě zpracovaných verifikačních dat 60 dBZ.

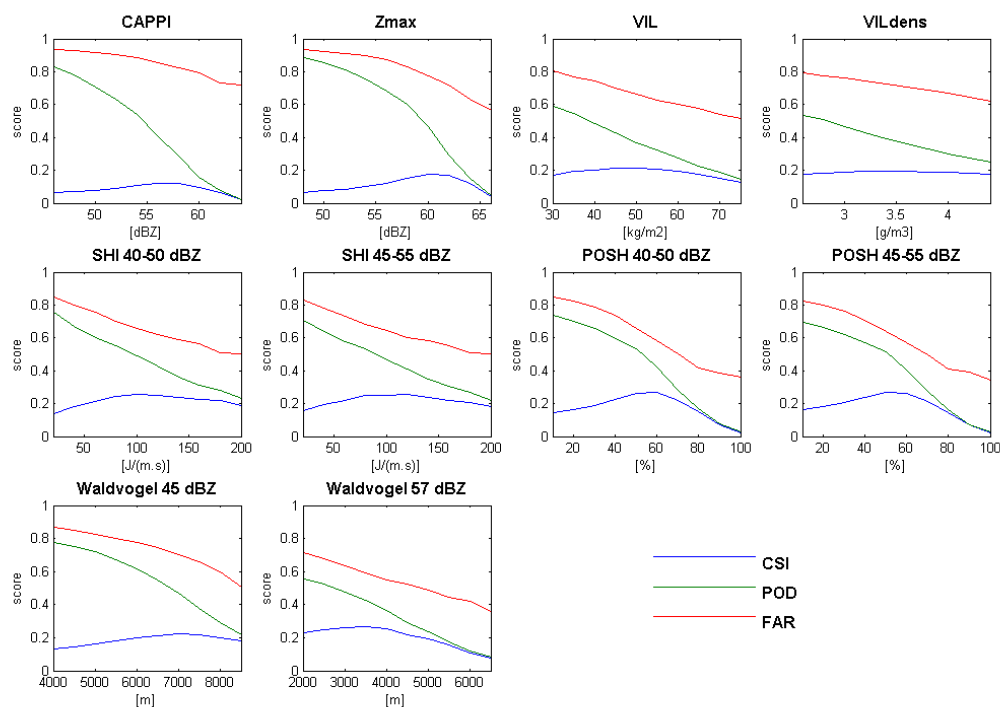
Pro vertikálně integrovaný vodní obsah VIL je CSI nejvyšší pro 45 kg/m^2 . Ve vrstevnaté oblačnosti je VIL většinou menší než 10 kg/m^2 , v bouřkách bývají hodnoty (mnohem) vyšší. V literatuře však nelze nalézt konkrétní hodnotu VIL vhodnou k detekci krup. Lenning et al. (1998) navrhli používat různý práh podle podmínek v daném dni.

Jako vhodnou prahovou hodnotu pro detekci krup pomocí VIL_{dens} určili Amburn a Wolf (1997) hodnotu $3,5 \text{ g/m}^3$. Mnou nalezená prahová hodnota pro VIL_{dens} $3,6 \text{ g/m}^3$ je tak velmi blízká. Výhody použití VIL_{dens} oproti VIL byly v literatuře diskutované (viz kap. 5.4). Při mé verifikaci se úspěšnost VIL s prahem 40 až 55 kg/m^2 ukázala vyšší než pro VIL_{dens} s prahem $3,6 \text{ g/m}^3$.

Index nebezpečných krup SHI při původním nastavení prahů pro váhovou funkci odrazivosti na 40 a 50 dBZ vykazuje nejvyšší úspěšnost pro hodnotu SHI 100 J/(m.s) . Při posunutí prahů odrazivosti na 45 a 55 dBZ je úspěšnost o málo nižší, a to pro hodnotu SHI 120 J/(m.s) .

Pravděpodobnost nebezpečných krup POSH vykazuje na rozdíl od SHI vyšší úspěšnost při zvýšených prazích odrazivosti. Pro POSH při původních prazích odrazivosti 40 až 50 dBZ je nejvyšší CSI pro prahovou hodnotu 60% . POSH $45\text{--}55 \text{ dBZ}$ dosahuje nejvyšší úspěšnosti při prahové hodnotě 50% a tato hodnota CSI ($0,268$) je nejvyšší nalezená mezi testovanými metodami.

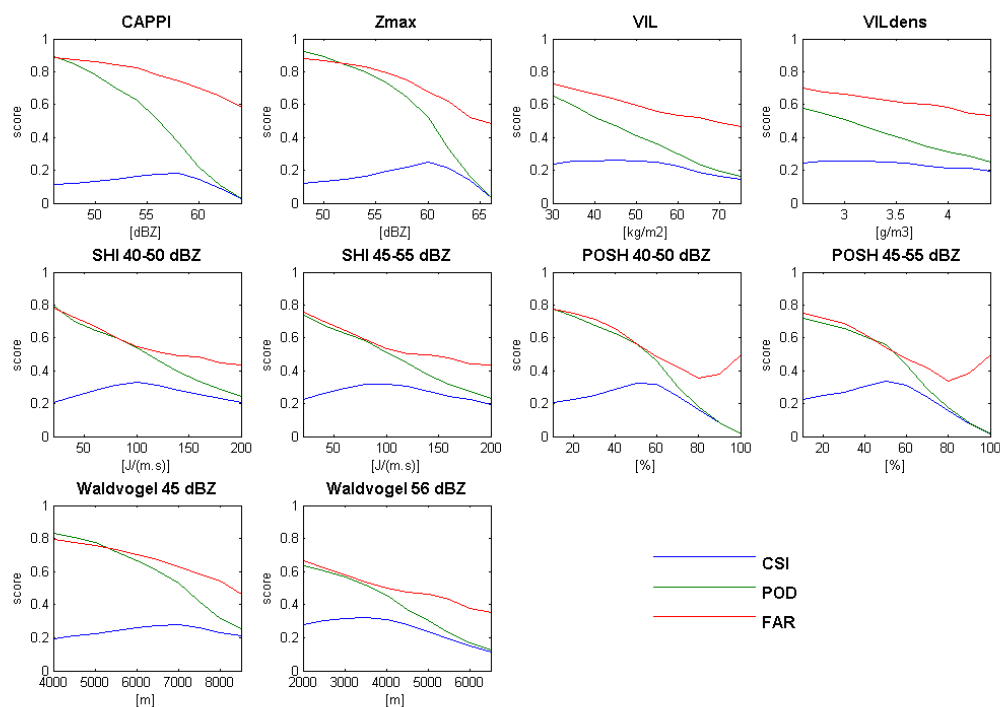
Kritérium podle Waldvogela při použití původní prahové hodnoty odrazivosti 45 dBZ dává nejlepší shodu při výškovém rozdílu 7 km . Při zvýšení prahové hodnoty odrazivosti na 57 dBZ je nejvyšší úspěšnost kritéria při výškovém rozdílu 3500 m . Úspěšnost tohoto kritéria je pak téměř shodná s nejvyšší spočtenou úspěšností pro POSH $45\text{--}55$. Zvýšení hodnoty prahu odrazivosti pro kritérium podle Waldvogela se tak jeví jako vhodné.



Obr. 8.3 Verifikační parametry testovaných metod pro různé prahové hodnoty v celé zájmové oblasti.

8.5 Verifikace ve zmenšené zájmové oblasti

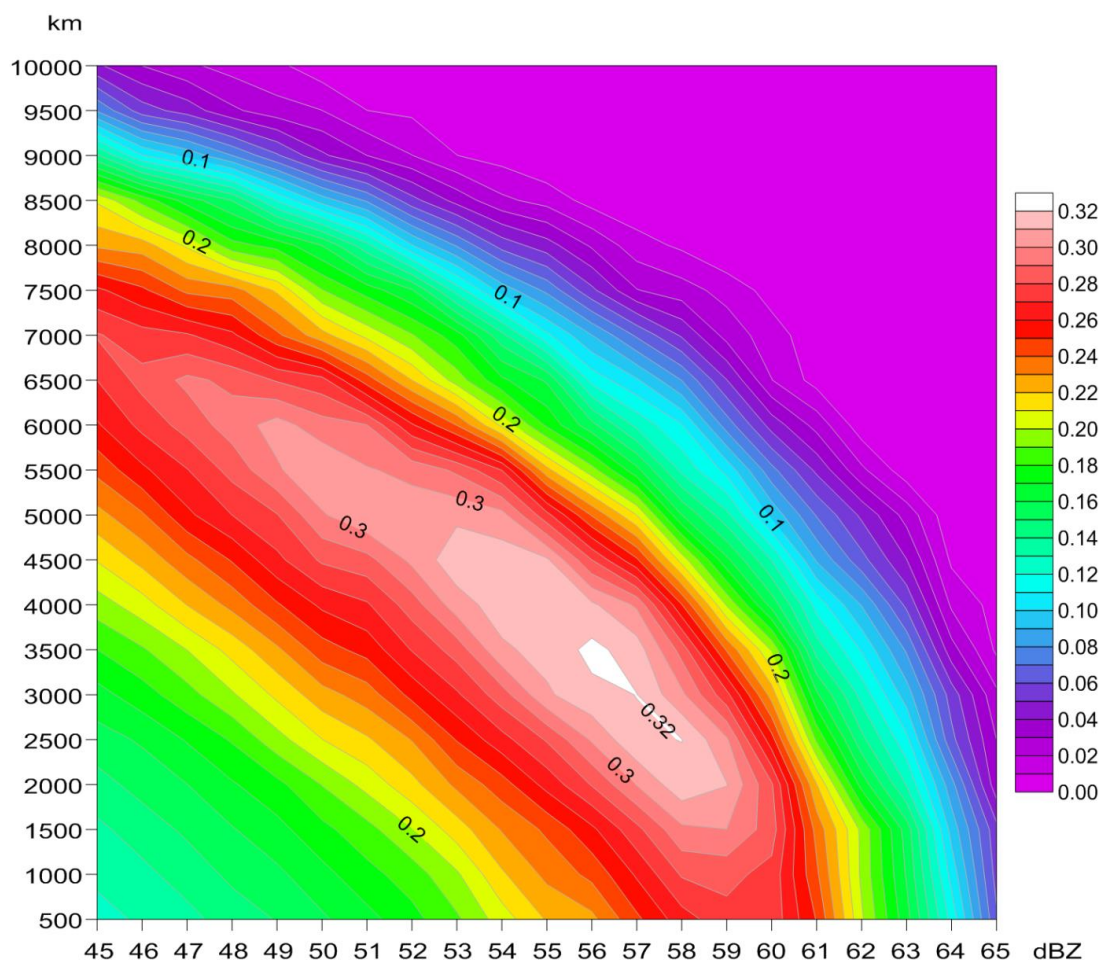
Pro přesnější verifikaci jsem zvolila zmenšenou zájmovou oblast okolí Stuttgartu (obr. 8.1). Toto území jsem vybrala z několika důvodů, které mohou vést ke zkvalitnění dat vstupujících do verifikace. Předně se jedná o hustě obydlenou oblast, kde mají poštovní oblasti malé plochy, což zvyšuje přesnost lokalizace krupobitních škod. V oblasti se nachází 239 poštovních oblastí a mají průměrnou velikost 20 km². V hustě obydlené oblasti lze očekávat, že nechybí záznamy o silném krupobití. Naopak například ve Schwarzwaldu mohou záznamy o krupobití chybět, protože zasáhlo neobydlenou oblast. Další výhodou zmenšené zájmové oblasti je, že ve směru od radaru není stíněna terénní překážkou. Oblast byla zvolena v rozmezí 30 až 60 kilometrů od radaru, což je vzdálenost s nejkvalitnějšími radarovými daty. Do výpočtu některých metod vstupují data z aerologických sondáží. Tyto informace jsou získávány z aerologické stanice, která se nachází ve středu zmenšeného zájmového území (Stuttgart - Schnarrenberg), a tak dobře charakterizuje podmínky ve zmenšené zájmové oblasti.



Obr. 8.4 Verifikační parametry testovaných metod pro různé prahové hodnoty v oblasti Stuttgart.

Výsledky verifikace ve zmenšené zájmové oblasti okolí Stuttgartu jsou znázorněny na obr. 8.4. Prahové hodnoty s nejvyšším CSI pro testovaná kritéria zůstaly totožné, nebo se jen málo změnily oproti optimálním prahovým hodnotám zjištěným v celé zájmové oblasti (tab. 8.3). Ve srovnání s maximálními hodnotami CSI pro jednotlivé metody v oblasti Bádenska-Württemberska se maximální hodnoty CSI pro oblast Stuttgartu mírně zvýšily. Nejvyšší hodnoty CSI dosáhlo kritérium POSH 45-55 dBZ s prahovou hodnotou 50%, a to 0,336 (Skrpniková a Řezáčová, 2013b).

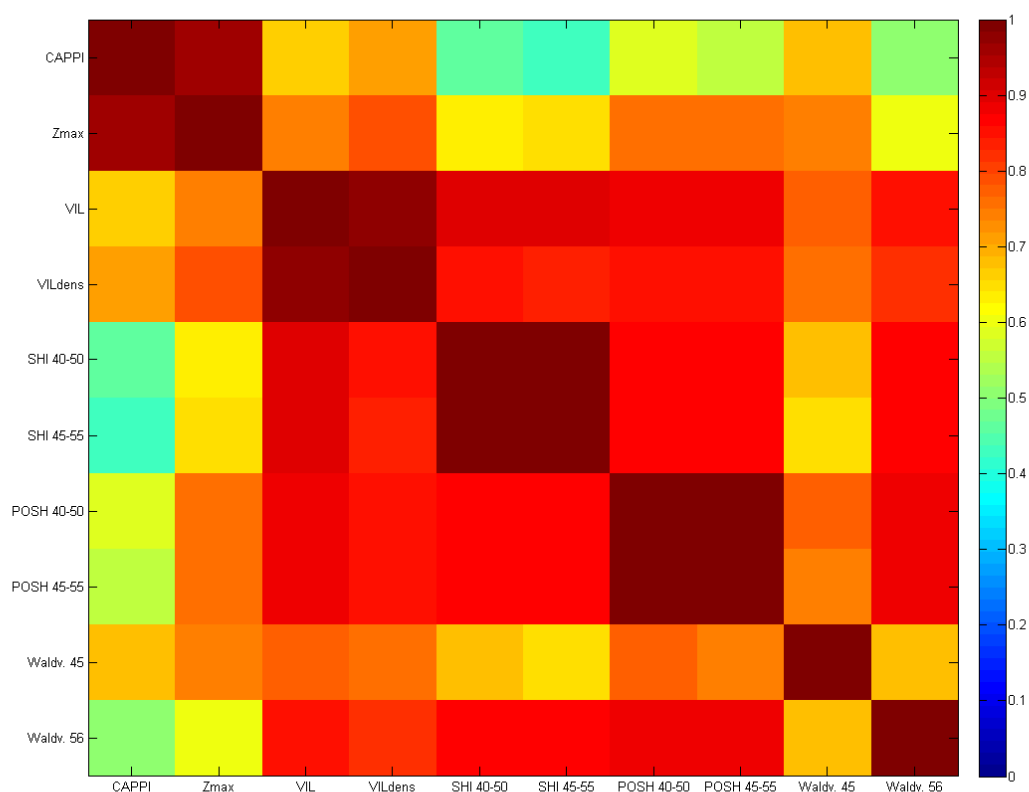
Při testování kritéria podle Waldvogela byla nejvyšší hodnota CSI = 0,323 dosažena při parametru odrazivosti 56 dBZ a prahové hodnotě 3500 m. Jako optimální pro detekci krup tak vychází kritérium splňující, že maximální výška odrazivosti 56 dBZ přesahuje nulovou izotermu nejméně o 3500 m. Na obr. 8.5 jsou zobrazeny hodnoty CSI pro různé kombinace parametru odrazivosti a prahové hodnoty.



Obr. 8.5 Index CSI pro různé kombinace prahových hodnot metody Waldvogel.

9. Kombinované kritérium

V obou studovaných regionech prokázaly testované metody schopnost detekovat silné krupobití. Pro další zvýšení účinnosti detekce krup jsem vytvořila kombinované kritérium (COMBI) jako kombinaci nejúspěšněji se projevujících jednotlivých kritérií. Ke kombinaci jsem přistoupila přesto, že jednotlivá kritéria spolu výrazně korelovala (obr. 9.1). Podobný přístup použili například San Ambrosio et al. (2007), když vytvořili modul pro detekci krup kombinací VIL-density a HDA.



Obr. 9.1 Vzájemná korelace jednotlivých metod detekce krup v zájmové oblasti Stuttgart.

Základní formu pro COMBI kritérium jsem vytvořila na základě dat z okolí Stuttgartu. Zvolila jsem kritéria, která samostatně dosahovala nejvyšších hodnot CSI, tedy SHI 40-50, POSH 45-55 a Waldvogelovo kritérium s upraveným parametrem odrazivosti. Pro tři zvolená kritéria jsem vybrala nové sady možných prahových hodnot a nově jsem otestovala všechny možné kombinace prahových hodnot a dvě varianty vyhodnocení výsledného kritéria na základě výsledku dílčích kritérií. V prvním případě bylo COMBI kritérium splněno, pokud bylo splněno alespoň jedno z dílčích kritérií, ve druhém případě bylo nutné splnění alespoň dvou

ze tří dílčích kritérií. Pro každé takto vytvořené kombinované kritérium byla spočítána hodnota CSI. Výsledná podoba COMBI kritéria pro okolí Stuttgartu je dána na základě nejvyšší nalezené hodnoty $CSI = 0,344$. Abych do výpočtu zahrnula vliv nejistoty při tvorbě COMBI kritéria, testovala jsem formu COMBI kritéria pro 20 kroupových událostí, vybíraných náhodně z celkově používaných 25. Tento postup jsem zopakovala šedesátkrát. Většinou příslušela nejvyšší hodnota CSI stejné kombinaci kritérií pro COMBI kritérium, jako při použití všech 25 událostí dohromady. Průměr nejvyšších hodnot CSI při těchto 60 testováních je 0,35. COMBI kritérium tedy platí, pokud je splněno alespoň 1 ze 3 kritérií: SHI 40-50 s prahovou hodnotou 60 J/(m.s), POSH 45-55 s prahovou hodnotou 50% a Waldvogel 54 dBZ s prahovou hodnotou 5500 m.

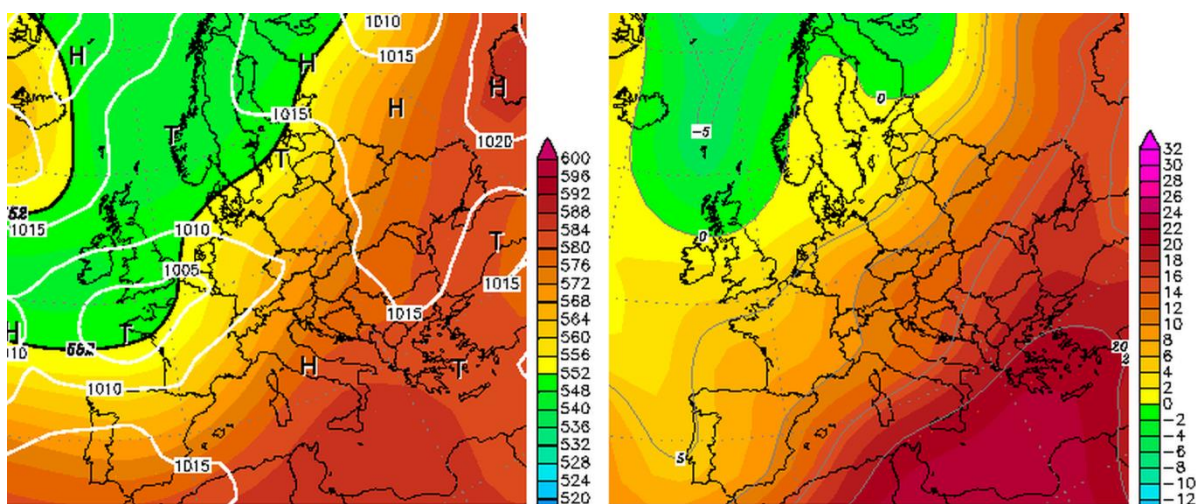
Protože při změně prahových hodnot v COMBI kritériu nedocházelo k velké změně v CSI, zachovala jsem pro Česko základní strukturu COMBI kritéria jako pro okolí Stuttgartu, ale upravila jsem prahové hodnoty dvou zahrnutých kritérií. Vycházela jsem z porovnání jednotlivých metod na území Česka a okolí Stuttgartu. Pro Česko vyhovovaly vždy nižší prahové hodnoty (tab. 8.3). To souhlasí s úvahou, že v záznamech o škodách na území Bádenska-Württemberska údaje spíš chybí, a proto jsou prahové hodnoty nastavené podle největších škod příliš tvrdé. Konkrétní kombinaci prahových hodnot pro COMBI kritérium v Česku jsem zvolila tak, aby kroupové události měly v českých a německých datech podobné projevy co do počtu zasažených pixelů a termínů. A také aby detekované krupobití odpovídalo informacím o skutečném výskytu krup. COMBI kritérium pro Česko je splněno, pokud je splněno alespoň 1 z 3 kritérií: SHI 40-50 s prahovou hodnotou 60 J/(m. s), POSH 45-55 s prahovou hodnotou 30% a Waldvogel 52 dBZ s prahovou hodnotou 5500 m.

10. Případové studie

V následujících kapitolách jsou popsány 4 případy silného krupobití na území Česka. Zvolila jsem termíny 9. června 2009, 15. srpna 2010, 24. srpna 2011 a 2. července 2012. Cílem těchto případových studií je detailní popis situací se silným krupobitím, ilustrace fungování COMBI kritéria a porovnání s dostupnými informacemi o konkrétním krupobití.

10.1 Krupobití 9. června 2009

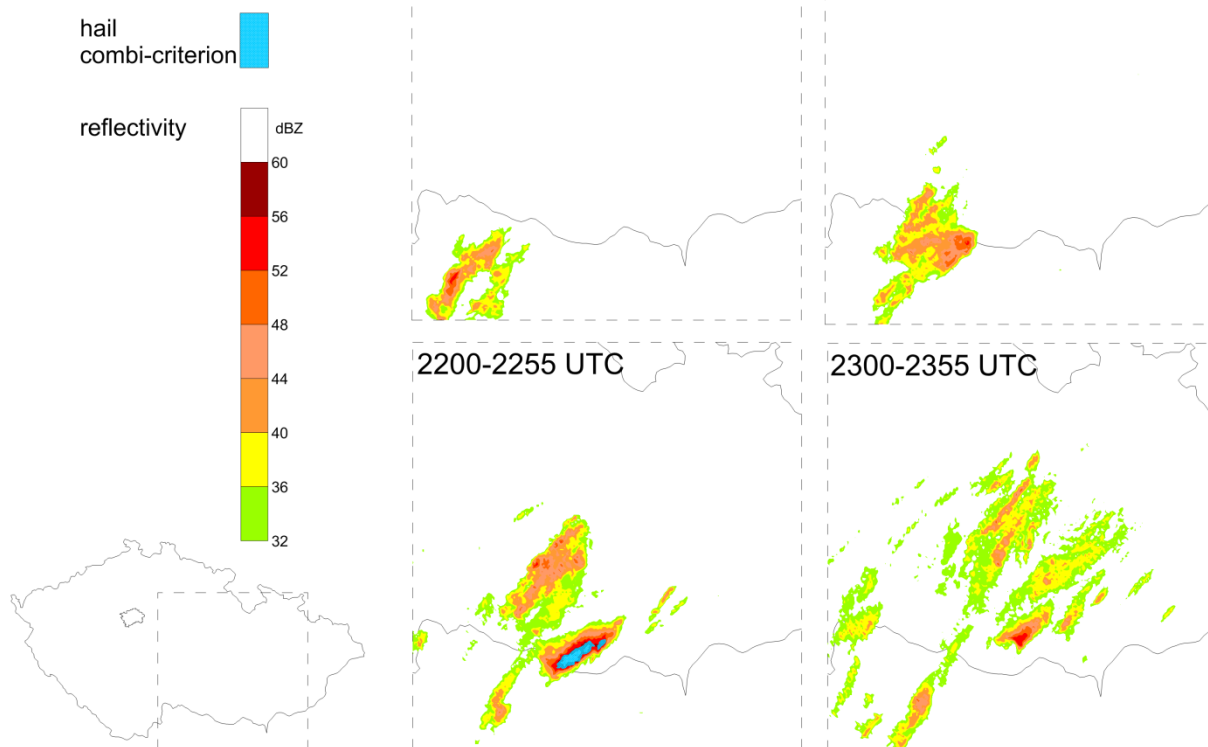
Ke konci první dekády července 2009 postupovaly z Atlantiku do západní a střední Evropy frontální systémy střídající se s více či méně výraznými výběžky vysokého tlaku vzduchu. Dne 9. 6. 2009 se území Česka nacházelo na přední straně brázdy nad západní Evropou a v noci na 10. 6. přecházela naše území studená fronta. Situaci ilustruje obrázek 10.1. Na této zvlněné studené frontě se vytvářely běžné letní bouřky. Pravděpodobně v blízkosti jedné vlny této fronty se před půlnocí vytvořila v pohraničí, jižně od Znojma, na tuto noční dobu nezvykle silná bouřka. Ta postupovala k severovýchodu a nejsilnější projevy v podobě přívalového deště, krupobití (kroupy kolem 3 cm) a lokálního nárazového větru se vyskytly právě na Znojemsku. Krupobití zasáhlo kolem 22 UTC obce Strachotice, Derflice, Chvalovice a další. Podle sdělovacích prostředků vrstva krup dosahovala až 25 cm. Kroupy rozbíjely okna, ničily omítky na domech a zničily úrodu a strhaly listí ze stromů. Případ i s příklady detekce krup pěti kroupovými kritérii je popsán v článku (Skripniková a Řezáčová, 2010).



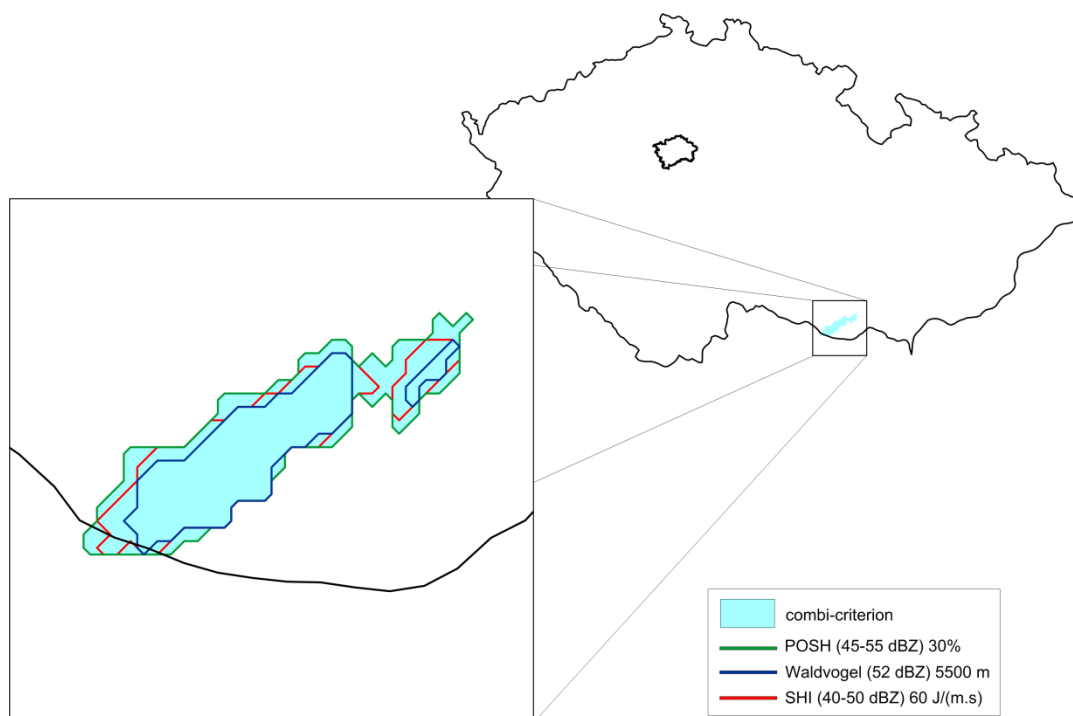
Obr. 10.1 AT 500 hPa a přízemní tlak (vlevo) a teplota v 850 hPa (vpravo) pro 9. 6. 2009, 00 UTC. Zdroj: www.wetterzentrale.de.

Na obr. 10.2 je znázorněn vývoj pole odrazivosti a plochy zasažené krupobitím podle COMBI kritéria. Krupobití je detekováno jen v jednom hodinovém okně a zasažená plocha má kompaktní tvar. Ve stejném období nebylo nikde jinde na území Česka krupobití detekováno. Výrazné vymezení události vůči okolí je dáno výskytem události v noci. Jednalo se o izolovaný dynamicky vyvolaný konvekční systém bez vlivu denního chodu termické konvekce. Na obr. 10.3 jsou pak znázorněny komponenty COMBI kritéria, které jsou v tomto případě velmi podobné.

9. 6. 2009



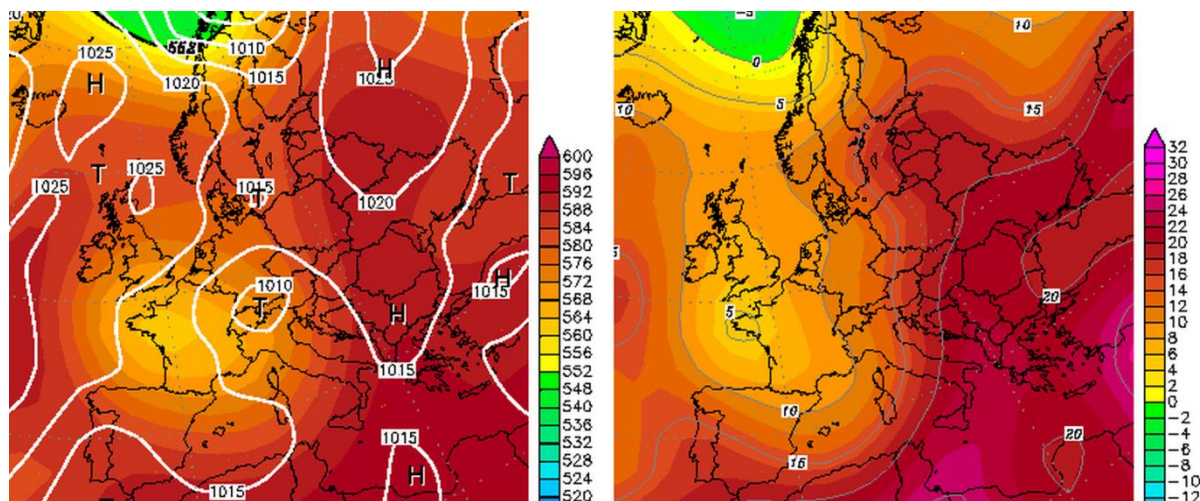
Obr. 10.2 Vývoj pole maximální odrazivosti a výskyt krupobití podle COMBI kritéria po hodinách dne 9. 6. 2009.



Obr. 10.3 Oblast zasažená kroupami podle COMBI kritéria 9. 6. 2009 20:00 – 23:55 UTC. Ve výřezu jsou znázorněny složky COMBI kritéria.

10.2 Krupobití 15. srpna 2010

Synoptická situace byla řízena rozsáhlou cyklonou ve středních a vyšších hladinách troposféry se středem jihozápadně od Francie, která se pohybovala východním směrem (Púčik et al., 2013). Dne 15. 8. 2010 se střed přízemní tlakové níže přesouval z jihovýchodního Německa do Čech a poté retrográdně do severovýchodního Německa (obr. 10.4).

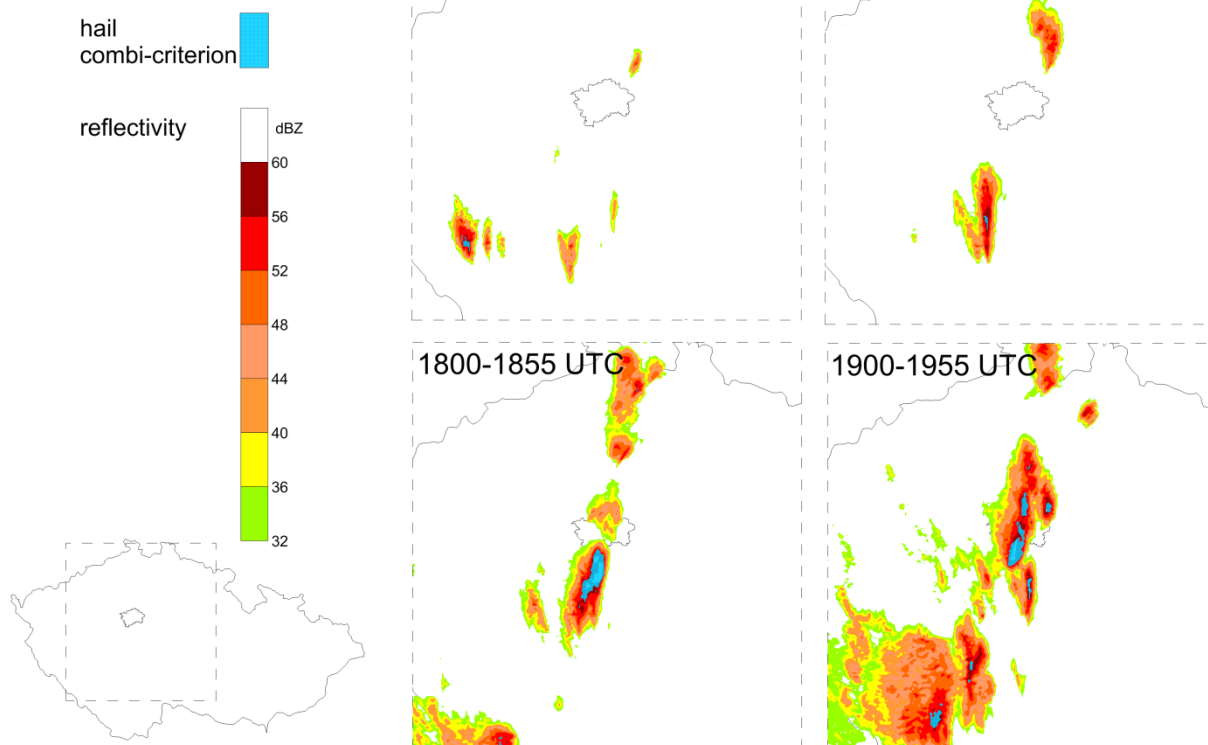


Obr. 10.4 AT 500 hPa a přízemní tlak (vlevo) a teplota v 850 hPa (vpravo) pro 15. 8. 2010, 00 UTC. Zdroj: www.wetterzentrale.de.

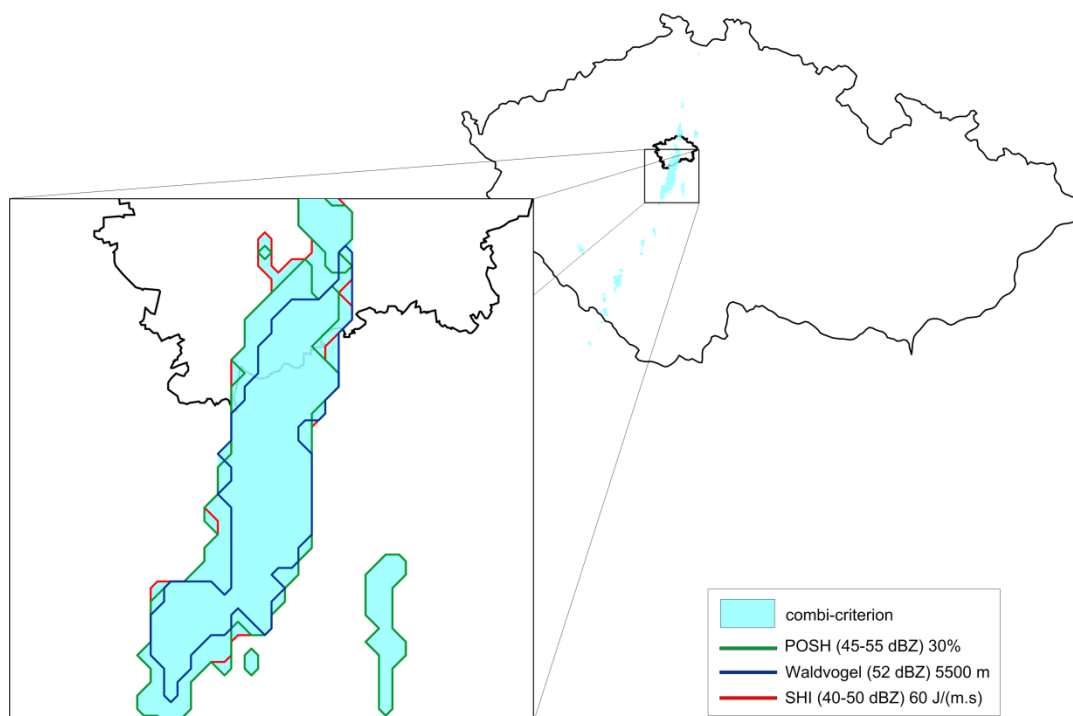
V odpoledních hodinách se vytvořila silná bouře s krupobitím na Sušicku. Večer postupovala z jižních Čech k severu supercela, která zasáhla po 21. hodině (19 UTC) Prahu silným krupobitím. Kroupy, které měly v průměru i přes 3 cm, způsobily značné škody na budovách a automobilech, také způsobily několik zranění.

Na obrázku 10.5 jsou pro 4 hodinové intervaly zachyceny oblasti, kde COMBI kritérium detekuje kroupy v poli maximální radarové odrazivosti. Výrazná oblast s detekovaným krupobitím je patrná jižně od Prahy a v jižní části Prahy po 18. hodině. Ve stejném období byly kroupy detekovány i jinde v Čechách, od podhůří Šumavy přes střední Čechy. Později, než je zobrazované období bylo krupobití detekováno i v okolí Varnsdorfu (Skripniková a Řezáčová, 2013a).

15. 8. 2010



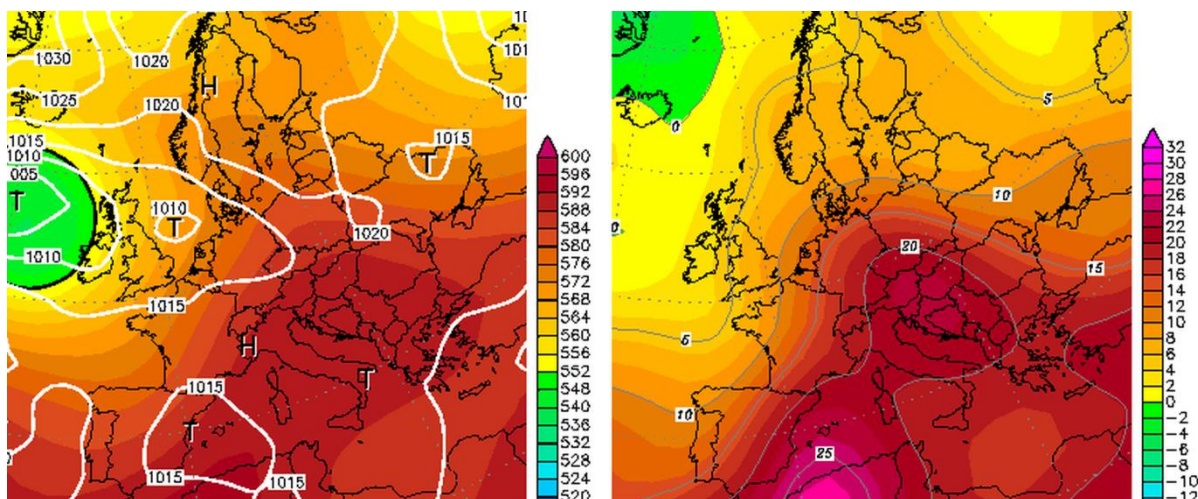
Obr. 10.5 Vývoj pole maximální odrazivosti a výskyt krupobití podle COMBI kritéria po hodinách dne 15. 8. 2010.



Obr. 10.6 Oblast zasažená kroupami podle COMBI kritéria 15. 8. 2010 16:00 – 19:55 UTC. Ve výřezu jsou znázorněny složky COMBI kritéria.

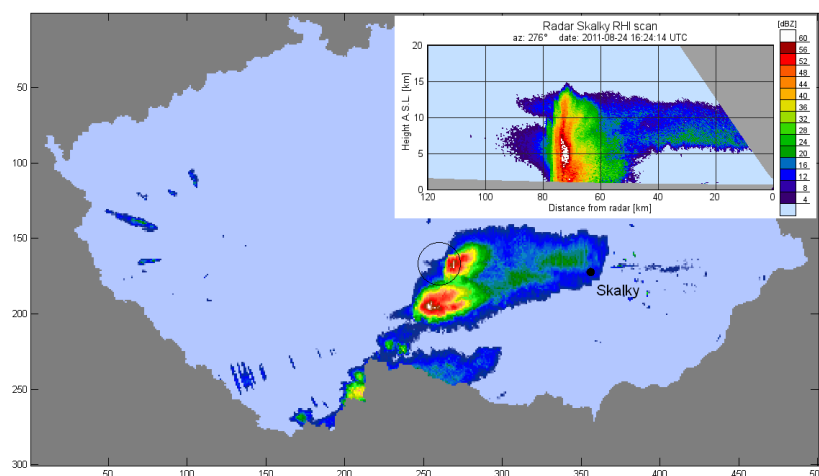
10.3 Krupobití 24. srpna 2011

Ve třetí dekádě srpna 2011 se nad Británií prohlubovala tlaková níže, po jejíž přední straně na naše území proudil velmi teplý vzduch od jihu (obr. 10.7). Teploty v té době byly výrazně nad normálem.



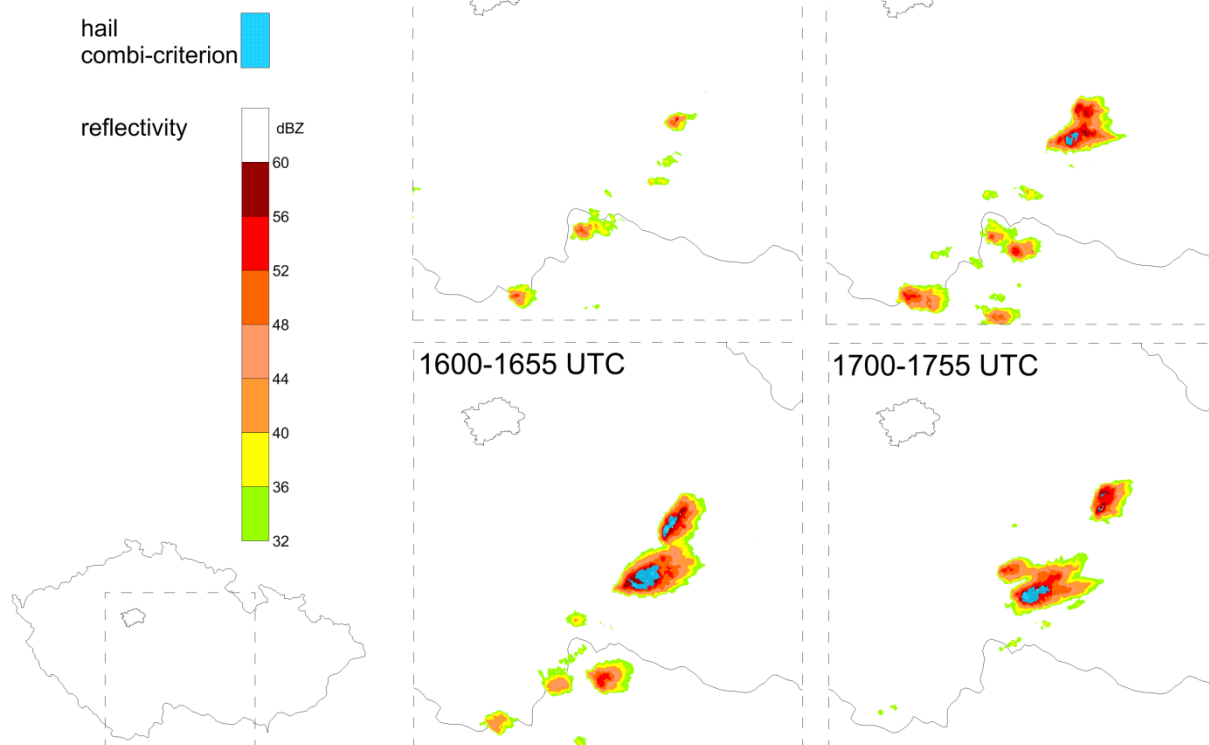
Obr. 10.7 AT 500 hPa a přízemní tlak (vlevo) a teplota v 850 hPa (vpravo) pro 24. 8. 2011, 00 UTC. Zdroj: www.wetterzentrale.de.

Dne 24. 8. se na území Česka vyskytovaly lokální bouřky. Krupobití je dokumentováno z okolí Příbyslavi v 16:30 UTC s maximálním průměrem krup 5 cm. Ve sdělovacích prostředcích jsou zmíněny kroupy velikosti třešní. Krupobití potvrzuje obr. 10.8 zachycující TBSS na RHI scanu i v poli maximální odrazivosti. Na obrázcích 10.8 až 10.10 je také krupobití detekované a skutečně pozorované na Jihlavsku.

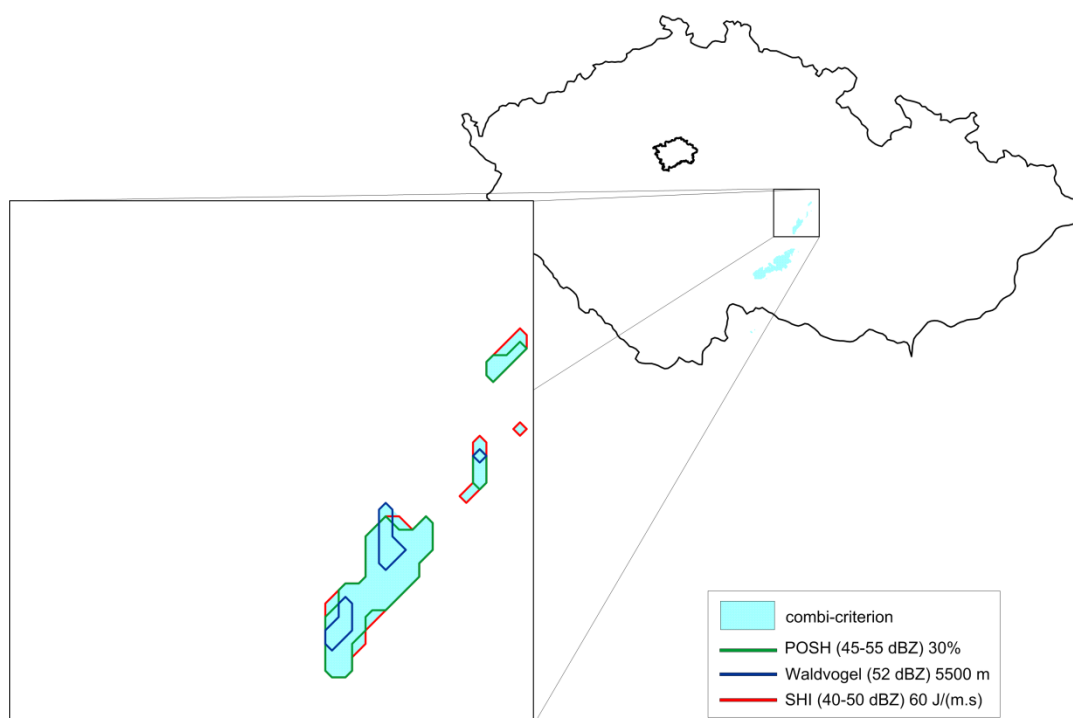


Obr. 10.8 Hail spike nebo-li Three-body scatter spike (TBSS) v RHI scanu z radaru Skalky a v poli maximální odrazivosti (černé kolečko) dokumentující krupobití nad Příbyslaví. Zdroj: ČHMÚ.

24. 8. 2011



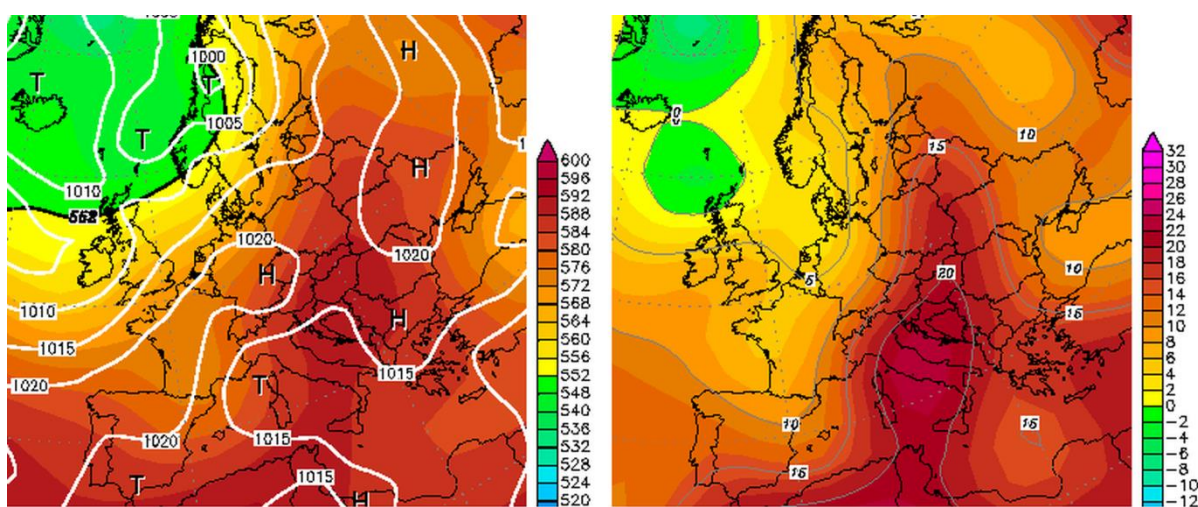
Obr. 10.9 Vývoj pole maximální odrazivosti a výskyt krupobití podle COMBI kritéria po hodinách dne 24. 8. 2011.



Obr. 10.10 Oblast zasažená kroupami podle COMBI kritéria 24. 8. 2011 14:00 – 17:55 UTC. Ve výřezu jsou znázorněny složky COMBI kritéria.

10.4 Krupobití 2. července 2012

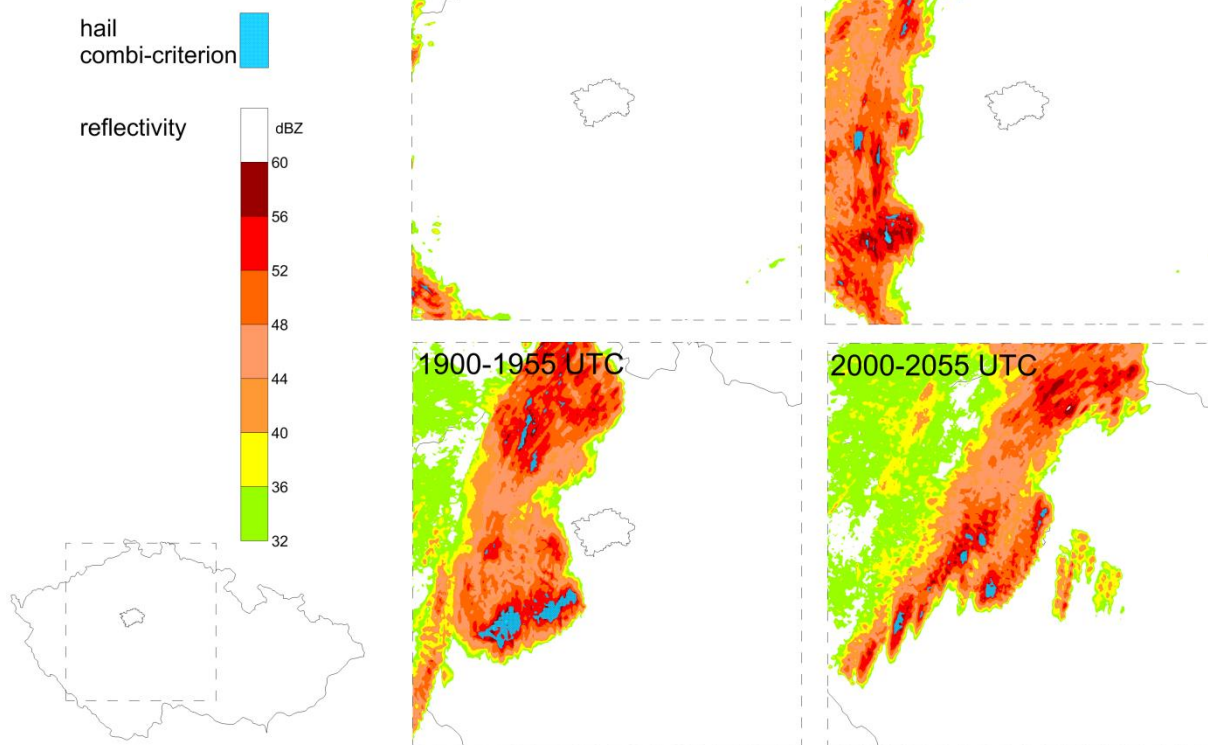
Na začátku července 2012 převládalo nad střední Evropou nevýrazné tlakové pole, ve kterém se nacházelo frontální rozhraní mezi chladnou vzduchovou hmotou nad západní Evropou a velmi teplou vzduchovou hmotou, která převládala nad Evropou východní a částečně i střední (obr. 10.11). Na zmíněném rozhraní docházelo k vývoji silné konvekce a mělkých tlakových níží, spojených s výraznou bouřkovou a srážkovou činností. V pondělí 2. 7. postupovala přes Polsko k severovýchodu tlaková níže a zmíněné frontální rozhraní zůstávalo nad střední Evropou téměř bez pohybu a způsobilo odpoledne a večer vydatné srážky nad severozápadní polovinou Čech (Hydrometeorol. vyhodnocení..., 2012).



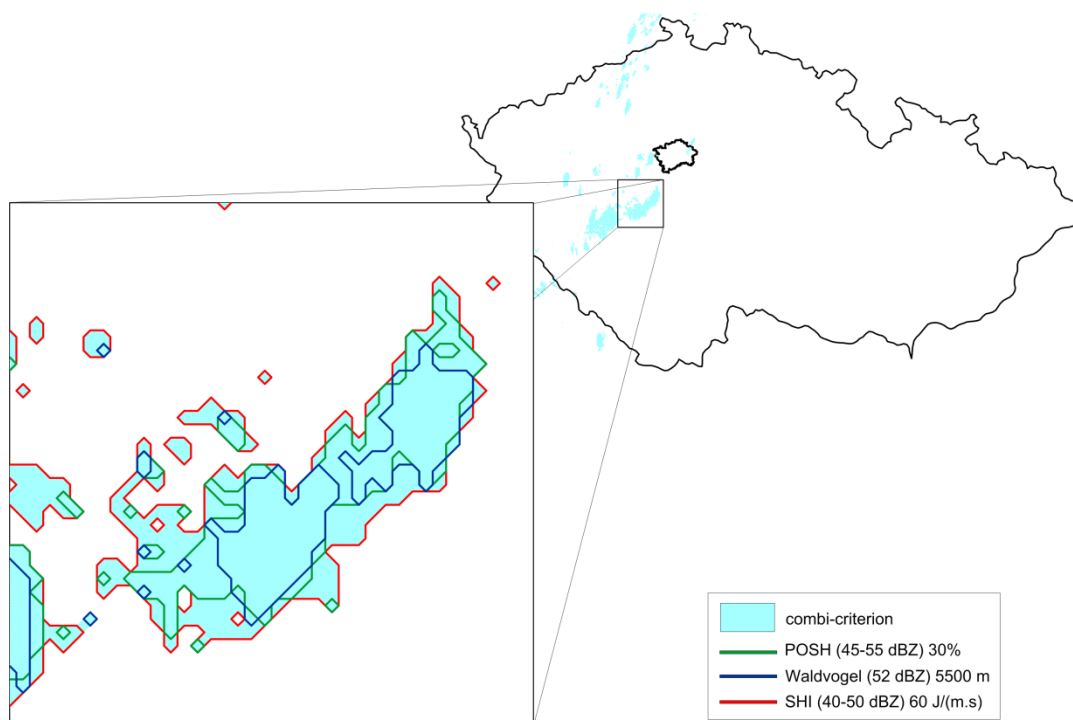
Obr. 10.11 AT 500 hPa a přízemní tlak (vlevo) a teplota v 850 hPa (vpravo) pro 2. 7. 2012, 00 UTC. Zdroj: www.wetterzentrale.de.

Ve sdělovacích prostředcích byly zmíněny kroupy větší než vejce, které padaly před desátou hodinou večerní (19:45 UTC) v obci Milín u Příbrami. Velké řídce padající kroupy poničily střechy, okna a automobily. Velké kroupy (5 cm v průměru) byly toho dne potvrzeny meteoroložkou také z obce Nečín. V databázi ESWD jsou zaznamenány kroupy o průměru 5 cm, maximálně 7 cm, v 19:30 UTC v Příbrami.

2. 7. 2012



Obr. 10.12 Vývoj pole maximální odrazivosti a výskyt krupobití podle COMBI kritéria po hodinách dne 2. 7. 2012.



Obr. 10.13 Oblast zasažená kroupami podle COMBI kritéria 2. 7. 2012 17:00 – 20:55 UTC. Ve výřezu jsou znázorněny složky COMBI kritéria.

11. Klimatologie vybraných kroupových kritérií

V následujících kapitolách se věnuji prostorovému a časovému rozložení výskytu krup v Česku, jak je detekují testované metody. Používám data z letních měsíců (květen až srpen) šestiletého období 2007 až 2012.

11.1 Plošné rozložení

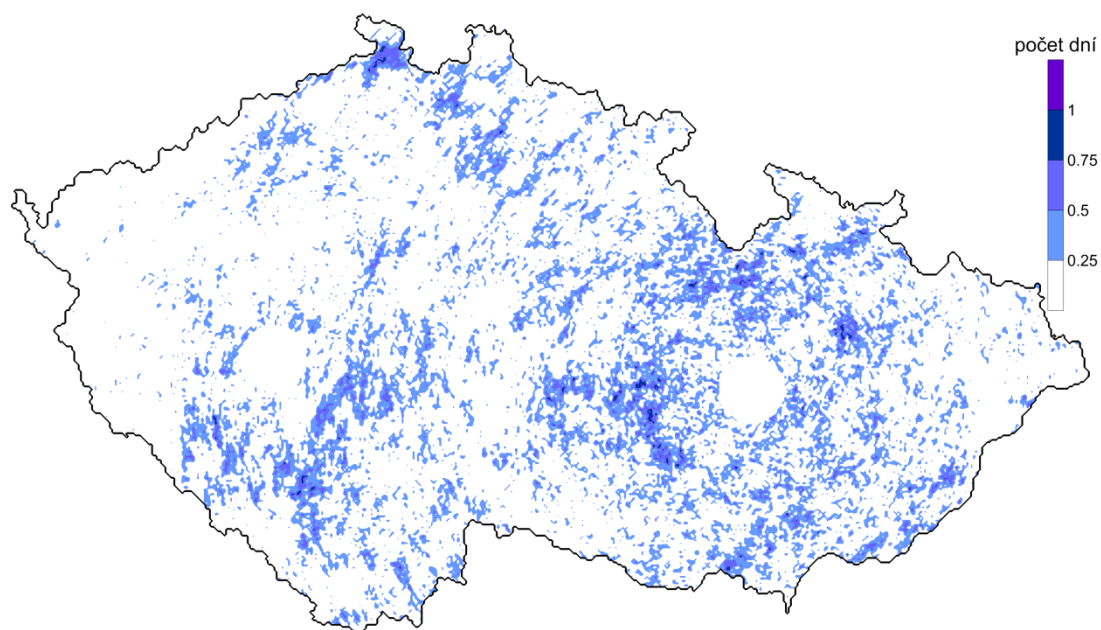
Nejprve uvádím mapy průměrného ročního počtu dní s kroupami, vytvořené na základě testovaných metod, a tedy vytvořených kritérií. Mapy jsem vytvořila pro 10 jednotlivých kritérií a pro COMBI kritérium (prahové hodnoty uvedené v tabulce 8.3 pro Česko - kapitola 8.2). V každém termínu radarového měření a v každém pixelu na území Česka bylo vyhodnoceno konkrétní kritérium, jestli detekuje kroupy. Den udávám v konkrétním pixelu jako kroupový, pokud alespoň v jednom termínu jsou zkoumaným kritériem detekovány kroupy.

Při zobrazování a jiném plošném hodnocení kritérií vždy vynechávám oblasti do vzdálenosti 15 km od radarů. V takové blízkosti radaru se projevují nepřesnosti v radarových datech. Do roku 2009 radar měřil nejvýše na elevaci 34,3° a od roku 2009 měří nejvýše na elevaci 21,6°. Radar tedy „nevidí“ přímo nad svou polohu a při vytváření pseudoCAPPI produktu, který ve výpočtech používám, se může uplatnit pozemní odraz jako nejbližší naměřená hodnota.

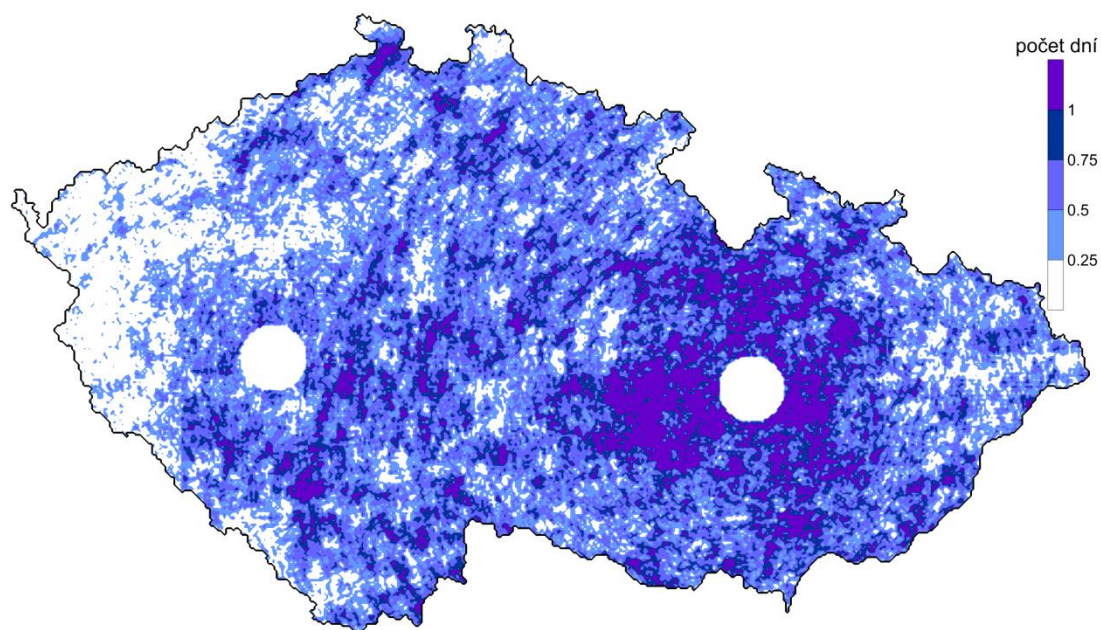
Ve všech mapách (obr. 11.1 až 11.11) je zřetelný rozdíl mezi oblastí pokrytou měřením obou radarů Brdy a Skalky a oblastmi s měřením pouze jednoho radaru. Tento problém je popsán již v kapitole 6.2. Zejména za dosahem radaru Skalky v západních Čechách jsou hodnoty výrazně nižší. Efekt se méně projevuje u kritérií CAPPI a Zmax, ostatní kritéria v oblasti za dosahem radaru Skalky nedávají žádný či téměř žádný výskyt krup. Mapy (obr. 11.1 až 11.11) jsou strukturálně podobné a znázorněné hodnoty se pohybují v obdobném rozmezí. Výrazně se liší pouze mapa pro průměrný roční počet dní s krupobitím při použití kritéria Zmax (obr. 11.2), kde hodnoty kolem jednoho dne s kroupami za rok pokrývají výrazně větší plochu, než je tomu při použití ostatních kritérií. Ve všech zmiňovaných mapách (obr. 11.1 až 11.11) je patrné, že výskyt dní s detekovanými kroupami nekoreluje s orografií.

Pro COMBI kritérium jsem vytvořila také korigovanou mapu s použitím různých prahových hodnot ve třech oblastech podle dosahu radarů (obr. 11.12). Pro představu o

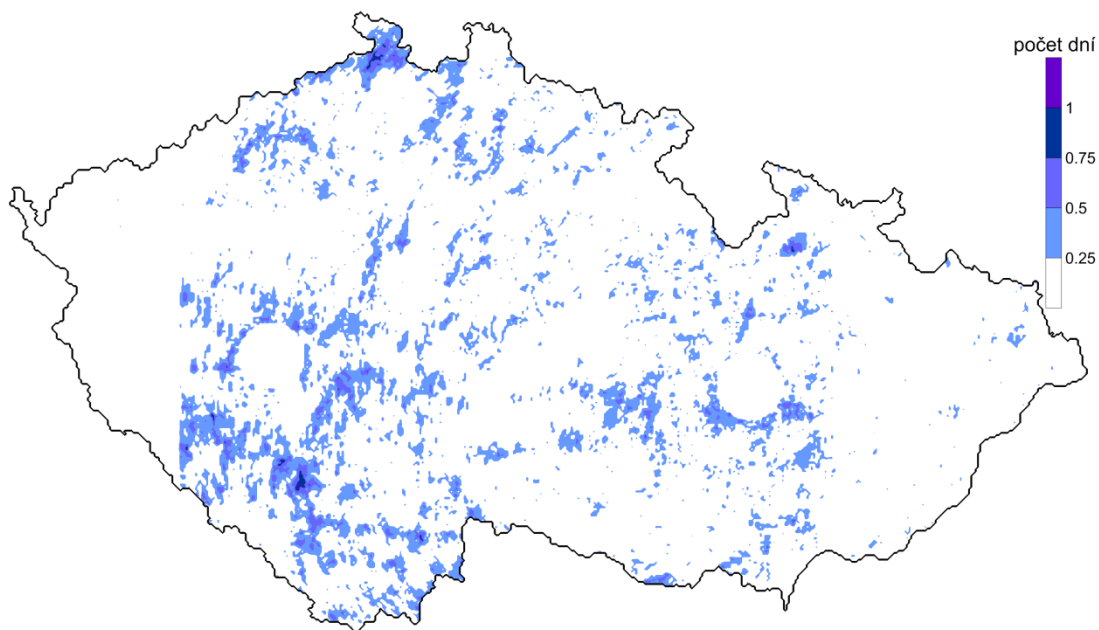
míře odlišnosti výskytu vysoké odrazivosti jsem počítala četnost hodnot maximálních denních odrazivostí ve třech oblastech. Na obrázku 11.13 je patrný rozdíl v četnosti výskytu vysokých odrazivostí. Radar Brdy tak dává hodnoty přibližně o 4 dBZ nižší než radar Skalky.



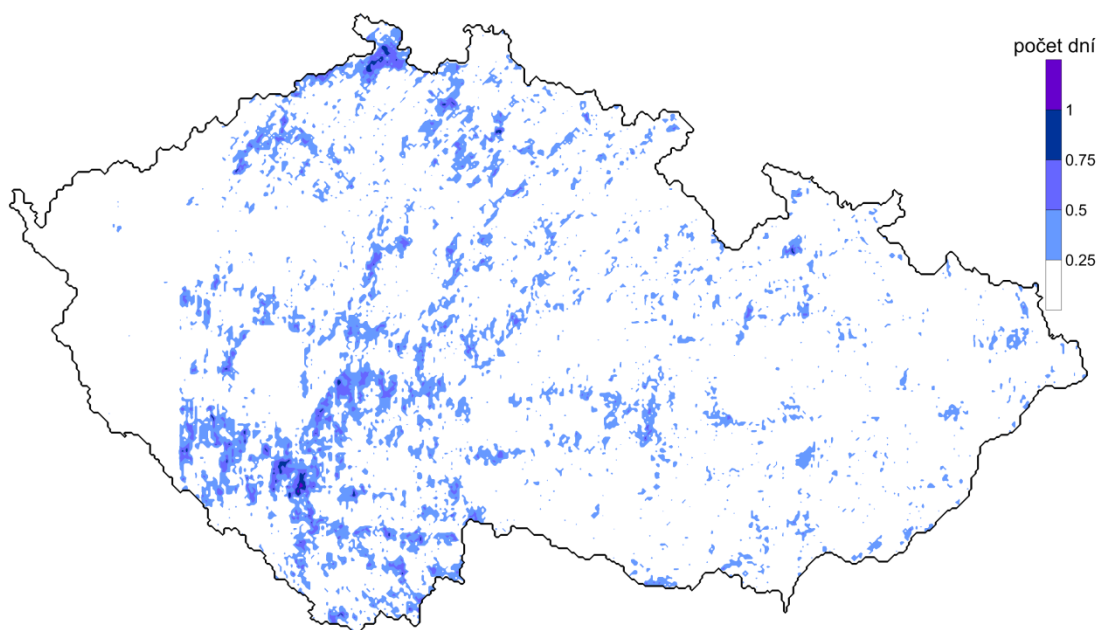
Obr. 11.1 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria CAPPI s prahovou hodnotou 55dBZ.



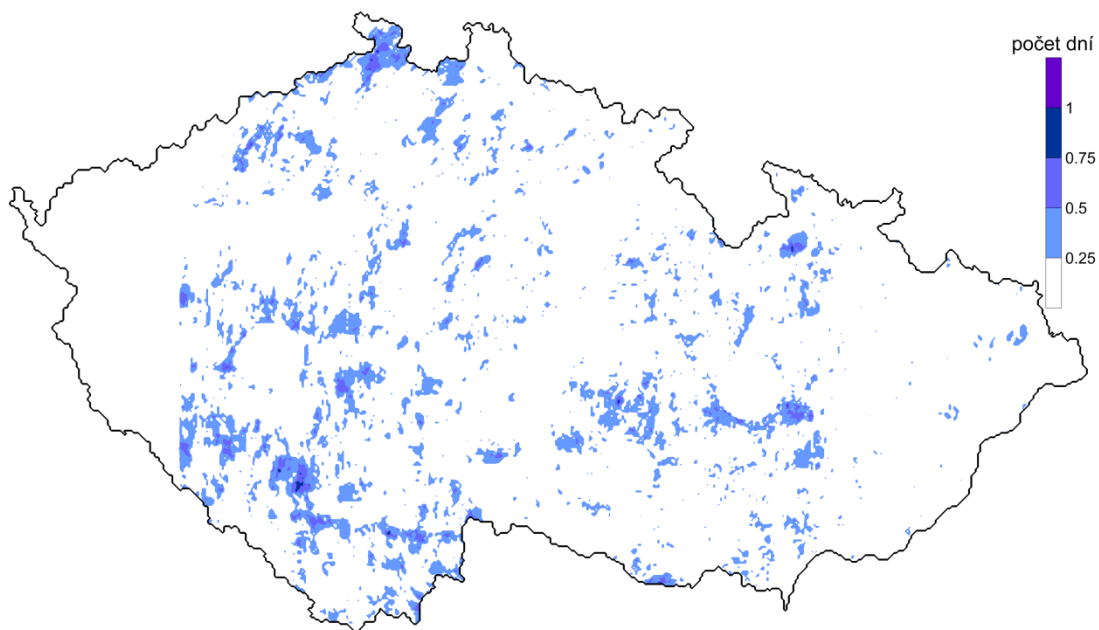
Obr. 11.2 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria Zmax s prahovou hodnotou 57dBZ.



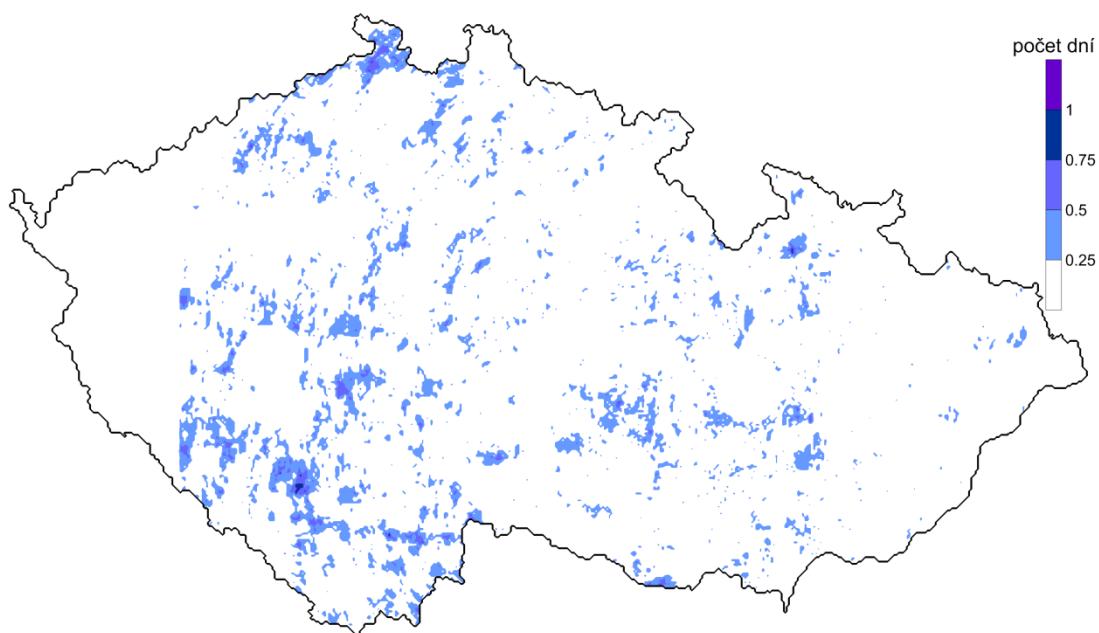
Obr. 11.3 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria VIL s prahovou hodnotou 34 kg/m^2 .



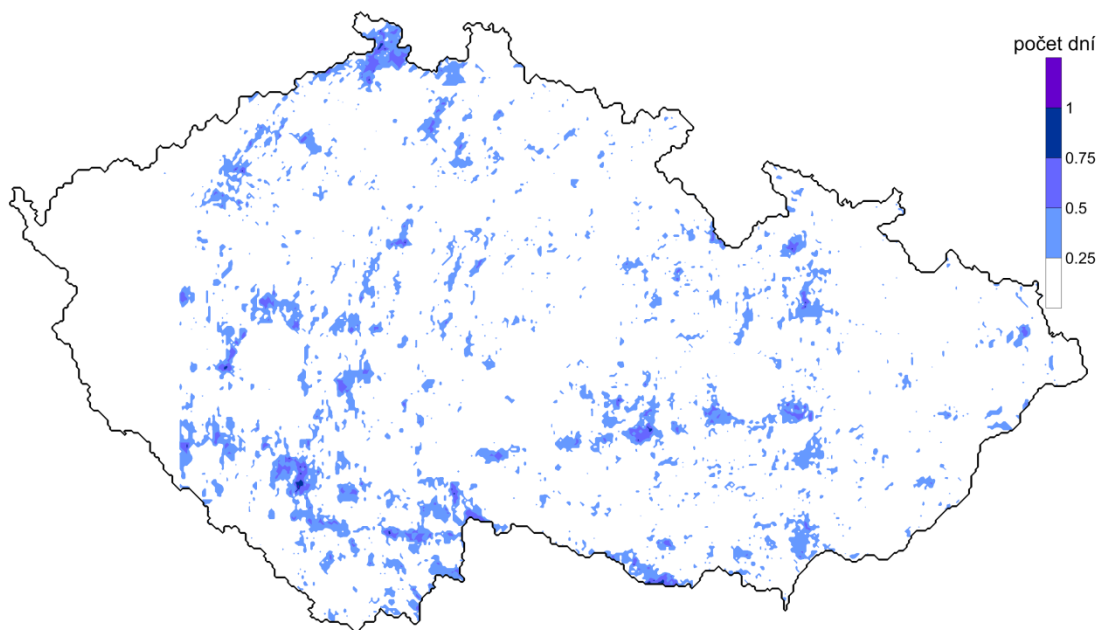
Obr. 11.4 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria VIL_{dens} s prahovou hodnotou $2,1 \text{ g/m}^3$.



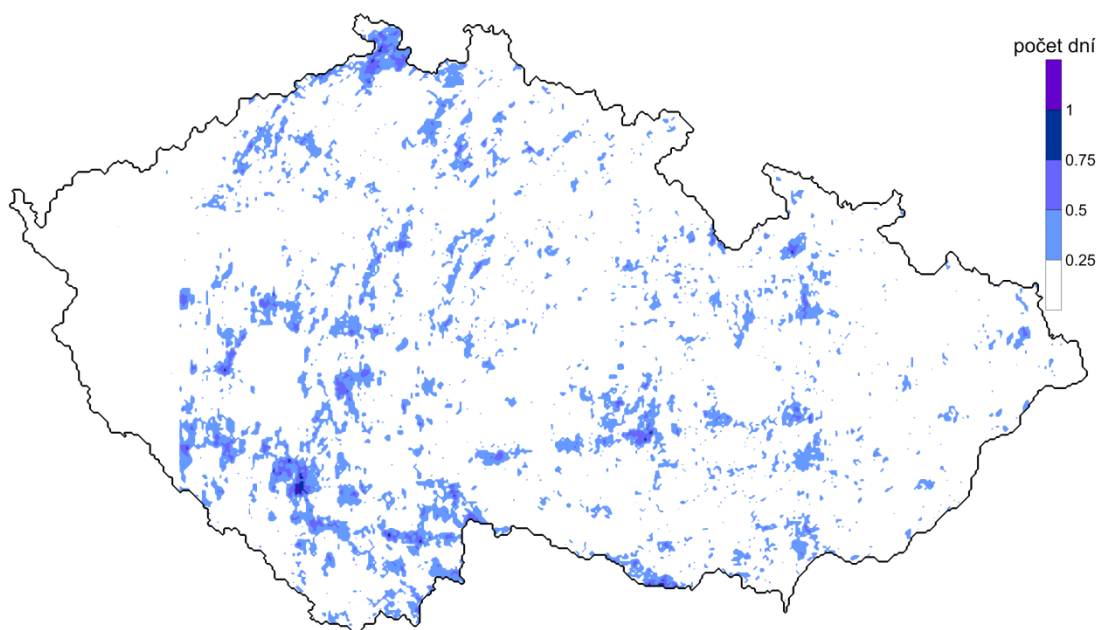
Obr. 11.5 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria SHI 40-50dBZ s prahovou hodnotou 60 J/(m.s).



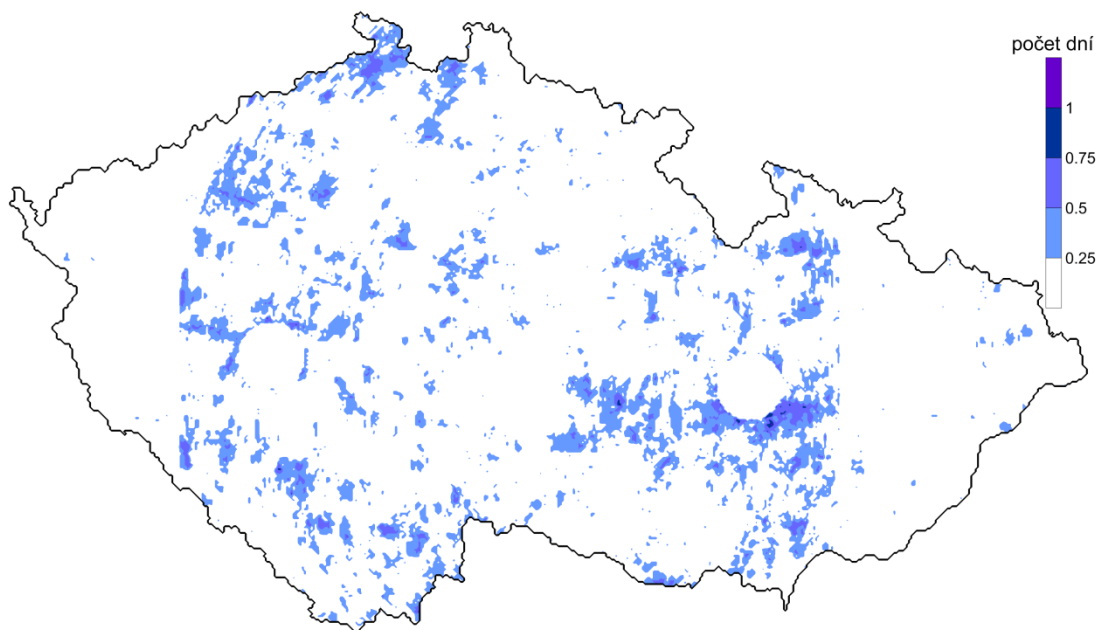
Obr. 11.6 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria SHI 45-55dBZ s prahovou hodnotou 50 J/(m.s).



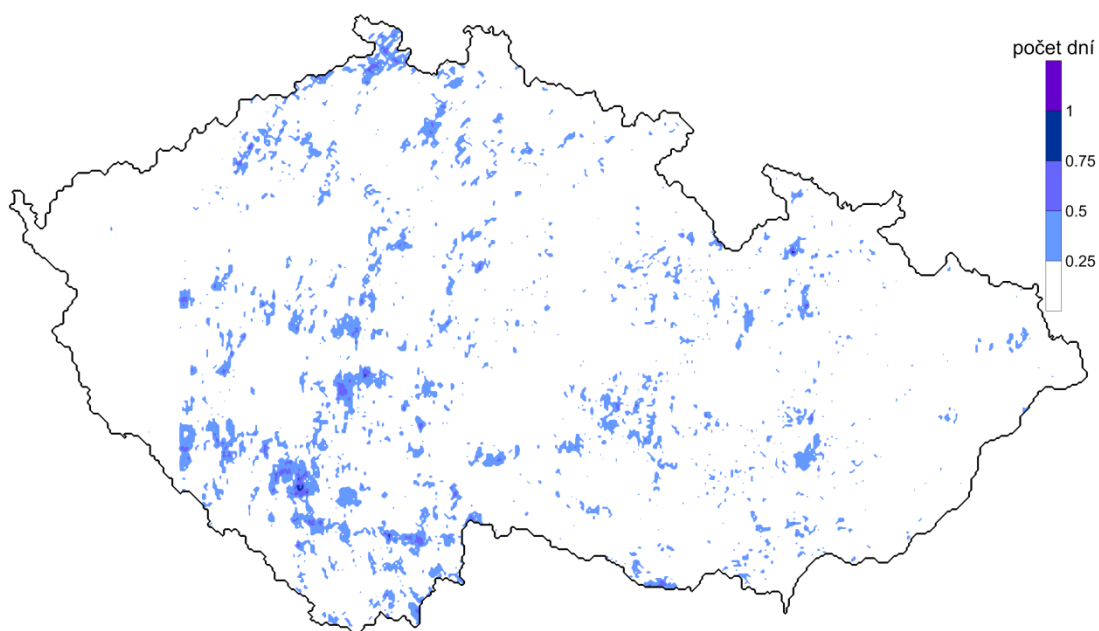
Obr. 11.7 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria POSH 40-50dBZ s prahovou hodnotou 40%.



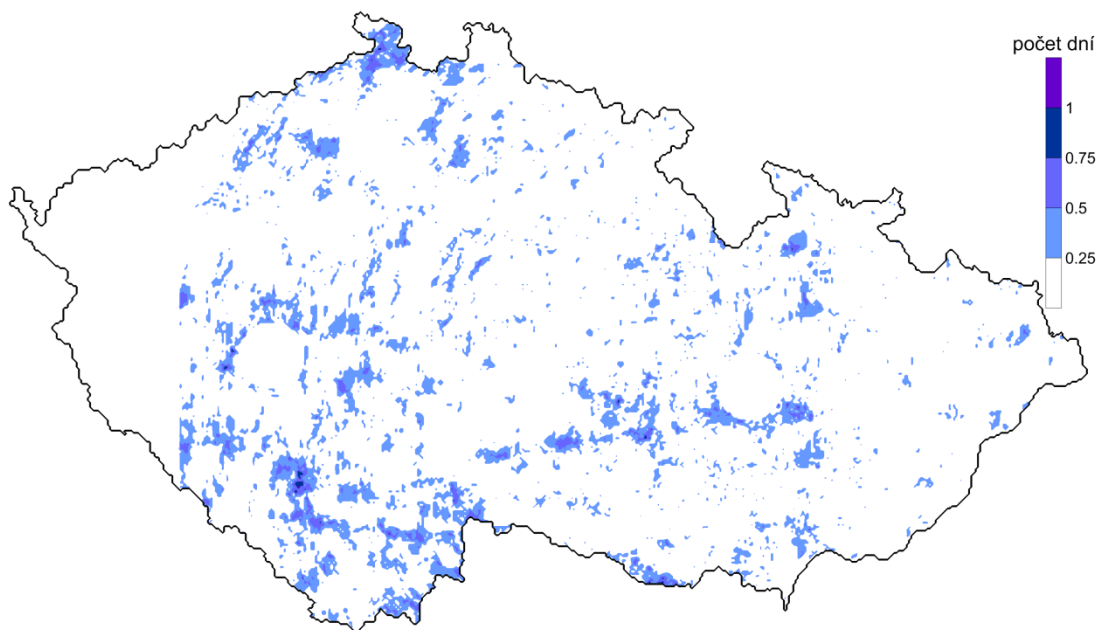
Obr. 11.8 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria POSH 45-55dBZ s prahovou hodnotou 30%.



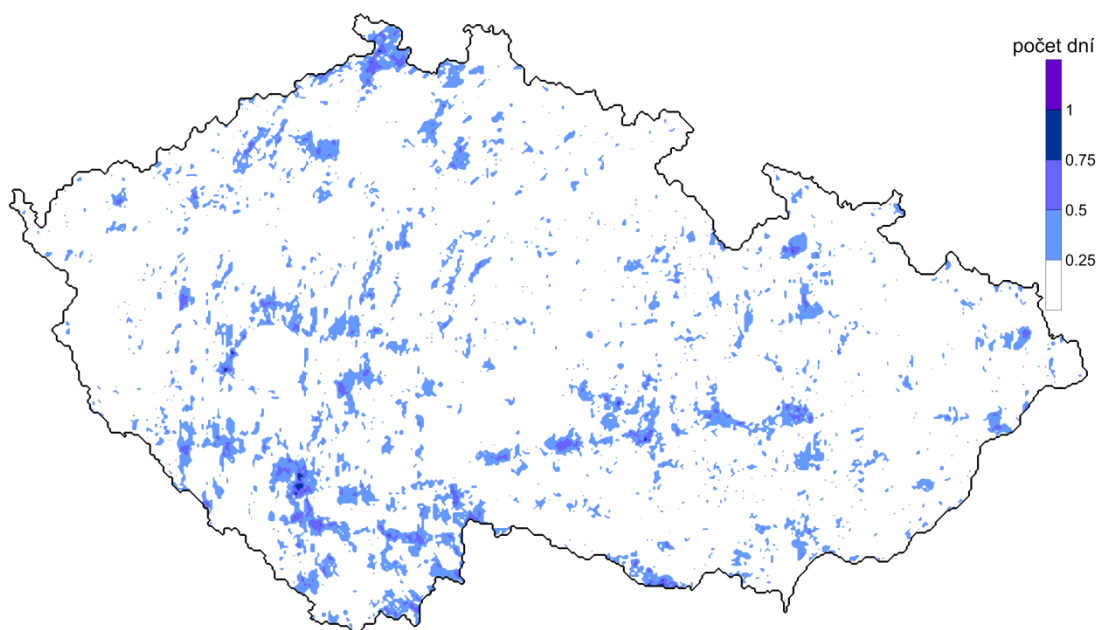
Obr. 11.9 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria podle Waldvogela s prahovou hodnotou odrazivosti 45dBZ a s prahem výškového rozdílu 7000 m.



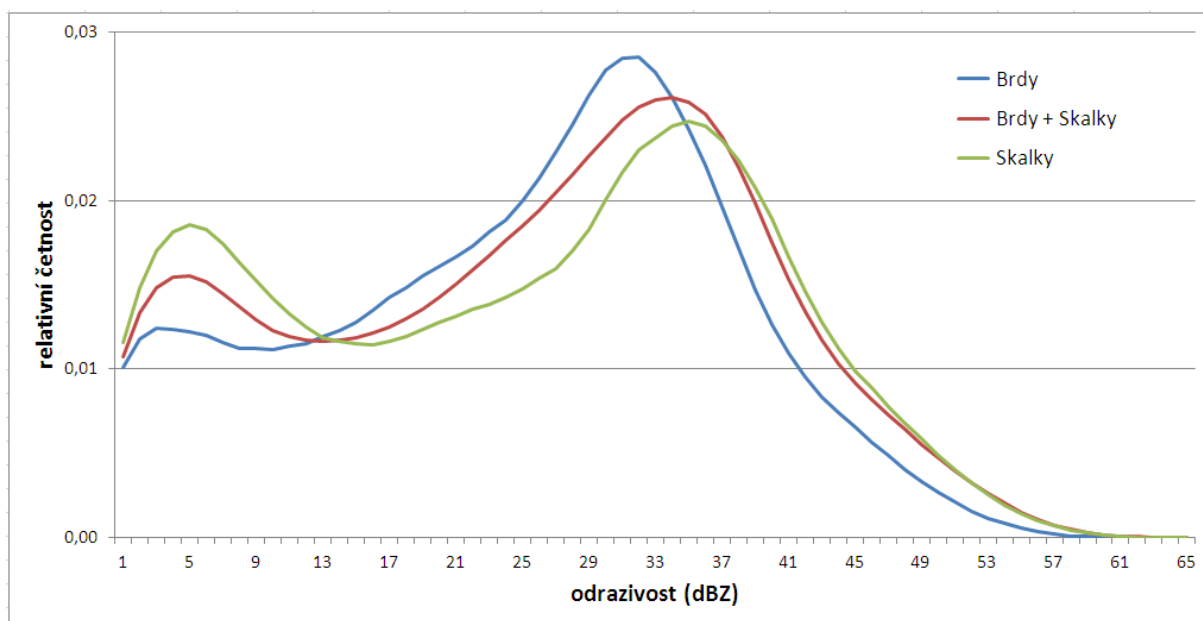
Obr. 11.10 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití kritéria podle Waldvogela s prahovou hodnotou odrazivosti 54dBZ a s prahem výškového rozdílu 3000 m.



Obr. 11.11 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití COMBI kritéria.



Obr. 11.12 Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití COMBI kritéria s upravenými prahovými hodnotami pro oblasti mimo dosah obou radarů.



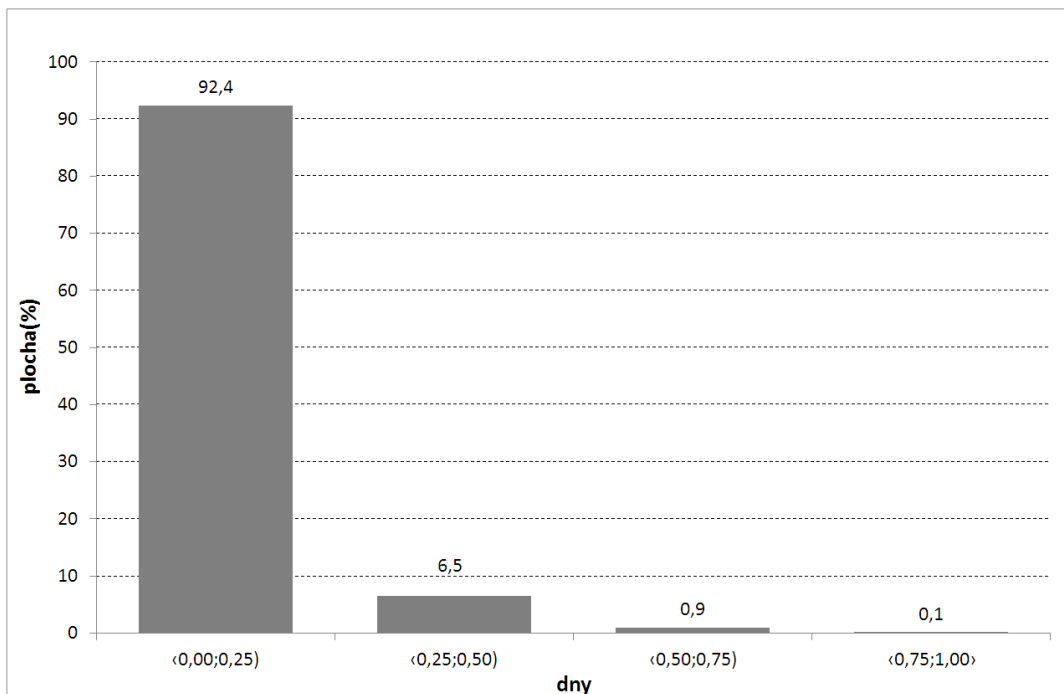
Obr. 11.13 Relativní četnost hodnot maximálních denních odrazivostí ve třech oblastech podle dosahu radarů v letech 2007-2012.

Na základě zmíněného rozdílu v četnostech výskytu vysokých odrazivostí u radarů a subjektivním vyhodnocením několika variant prahových hodnot v COMBI kritériu jsem použila v oblasti dosahu pouze radaru Brdy pozměněné COMBI kritérium: SHI 40-50dBZ/ 60 J/(m.s); POSH 45-55dBZ/10%; Waldvogel 49dBZ/ 4500m a v oblasti dosahu pouze radaru Skalky pozměněné COMBI kritérium: SHI 40-50dBZ/ 60 J/(m.s); POSH 42-52dBZ/30%; Waldvogel 49dBZ/ 5500m. Dále jsem již pracovala s výsledky kroupových dní vypočtených s různými tvary COMBI kritéria pro tři oblasti podle dosahu radarů.

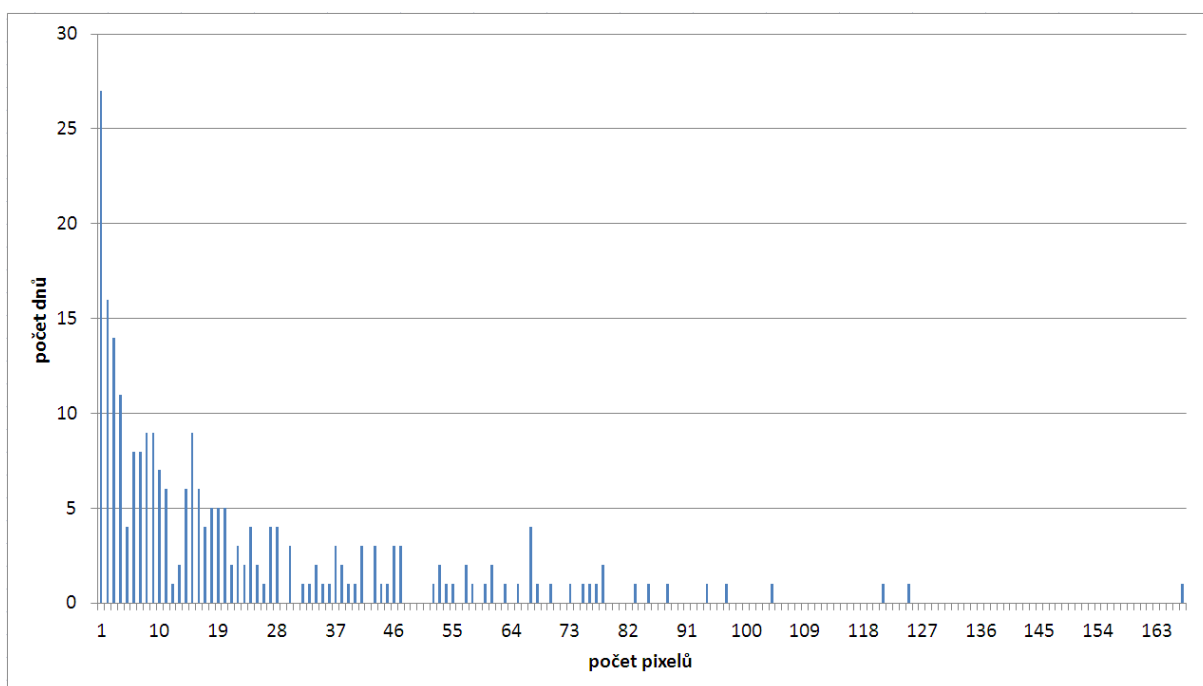
Plošné rozložení počtu kroupových dní za rok podle COMBI kritéria je tedy v upravené podobě na mapě v obrázku 11.12. Informace o plošném rozsahu průměrného ročního počtu dní s krupobitím je zpracována do grafu (obr. 11.14), který ukazuje relativní pokrytí území Česka pro 4 kategorie počtu kroupových dní za rok. Pro naprostou většinu území (92,4%) dává COMBI kritérium do čtvrtiny kroupového dne za rok, tři čtvrtiny až jeden den za rok vychází na 0,1% plochy Česka.

Pro vyjádření velikosti jednotlivých kroupových událostí, co do velikosti zasažené plochy, jsem studovala souvislé plochy pixelů splňujících COMBI kritérium. O velikosti ploch zasažených v jednotlivých dnech souvisle kroupovými pixely podle COMBI kritéria vypovídá graf na obrázku 11.15. V grafu je znázorněn počet dnů, kdy se vyskytla struktura s určitým počtem souvislých pixelů. Jedná se vždy o maximální strukturu za celý den. A pro každý den je započítána pouze tato největší struktura. Maximální zjištěná struktura měla rozlohu 167

pixelů a vyskytla se dne 19. 7. 2007. V tomto dni bylo krupobití zaznamenáno v brzkých ranních hodinách na Prachaticku, kde vytvořilo až 15 cm mocnou vrstvu krup. Odpoledne a večer téhož dne pak přes Česko od západu přecházely silné bouřky doprovázené přivalovým deštěm a krupobitím na Sušicku a Hořovicku.



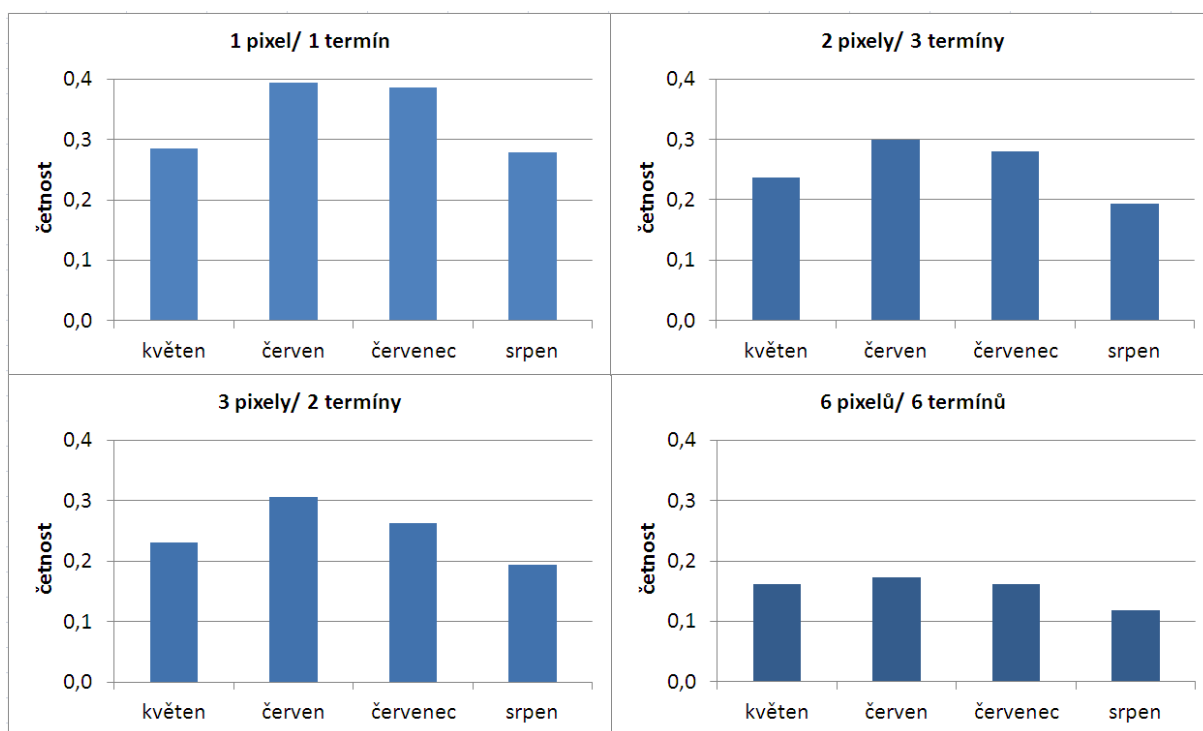
Obr. 11.14 Relativní pokrytí území Česka pro 4 kategorie průměrného ročního počtu kroupových dní.



Obr. 11.15 Celkový počet dnů za květen až srpen 2007-2012, kdy byla zjištěna souvislá plocha s určitým počtem pixelů splňujících COMBI kritérium alespoň v jednom termínu.

11.2 Sezonní chod

Protože se krupobití vyskytuje zejména v letních měsících, zabývám se v práci pouze teplým obdobím roku od května do srpna. Namísto ročního chodu tak popisuji sezonní chod. Pro sledování počtu kroupových dní v jednotlivých měsících bylo nutné se nejprve zabývat definicí kroupového dne. V každém termínu je určen počet pixelů, v nichž COMBI kritérium detekovalo kroupy. Na základě počtu kroupových pixelů a počtu termínů, ve kterých se vyskytly, jsou konstruovány různé definice kroupového dne. Alespoň jeden kroupový pixel se vyskytl v 248 dnech ze zkoumaných 738. Pokud je kroupový den uvažován až při výskytu nejméně dvou termínů vždy alespoň se třemi pixely splňujícími COMBI kritérium, je počet kroupových dní 183. Pokud je kroupový den definován výskytem alespoň šesti termínů s nejméně šesti pixely detekujícími kroupy podle COMBI kritéria, bylo takových dní za studované období 113. Na obrázku 11.16 je ve čtyřech grafech znázorněn sezonní chod průměrné roční četnosti kroupových dní pro studovaných šest let.



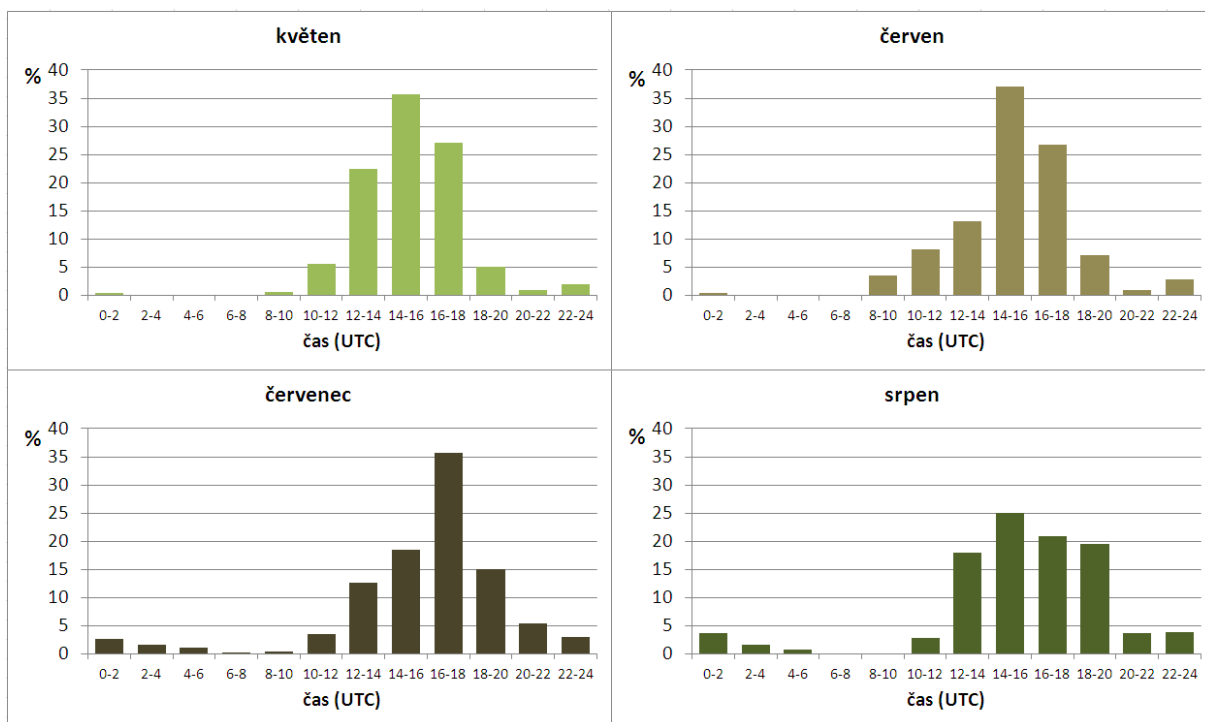
Obr. 11.16 Sezonní chod průměrné roční četnosti kroupových dní podle COMBI kritéria pro letní období 2007-2012. Jednotlivé histogramy odpovídají různým definicím kroupového dne. Označení v záhlaví každého grafu (X pixelů/ Y termínů) vyjadřuje definici kroupového dne jako požadavek splnění COMBI kritéria v alespoň X radarových pixelech během Y radarových termínů.

Uvedené grafy se liší použitou definicí kroupového dne. V prvním případě je kroupový den každý, kdy se v průběhu celého dne vyskytl na území Česka alespoň jeden pixel splňující

COMBI kritérium. Dále jsou použity definice kroupového dne vyžadující výskyt alespoň dvou termínů, každý nejméně se třemi ‚kroupovými‘ pixely, alespoň tří termínů se dvěma ‚kroupovými‘ pixely a alespoň šesti termínů s nejméně šesti ‚kroupovými‘ pixely. Sezonní chod počtu kroupových dní se liší hodnotami i průběhem v závislosti na použité definici. Pro všechny čtyři definice je maximum v červnu. Nejvyrovnanější je sezonní chod vytvořený na základě nejpřísnější definice kroupového dne (nejméně šest pixelů alespoň v šesti termínech).

11.3 Denní chod

Pro popis denního chodu krupobití v Česku na základě COMBI kritéria jsem studovala počty pixelů, ve kterých byly COMBI kritériem detekovány kroupy, v průběhu dne. Jak je znázorněno v grafech obrázku 11.17, liší se denní chod relativního počtu kroupových pixelů podle COMBI kritéria pro čtyři studované měsíce. V květnu, červnu a srpnu se maximum nachází v období 14-16 UTC. Pouze v červenci je maximum mezi 16-18 UTC. V květnu, červnu a červenci je do dvou hodin s maximálním počtem ‚kroupových‘ pixelů koncentrováno 35% všech ‚kroupových‘ pixelů průměrného dne měsíce. V srpnu je chod počtu ‚kroupových‘ pixelů mezi 12. a 20. hodinou relativně vyrovnaný a maximální hodnota ve 14-16 UTC tvoří 25% z celkového počtu ‚kroupových‘ pixelů v průměrném dni.

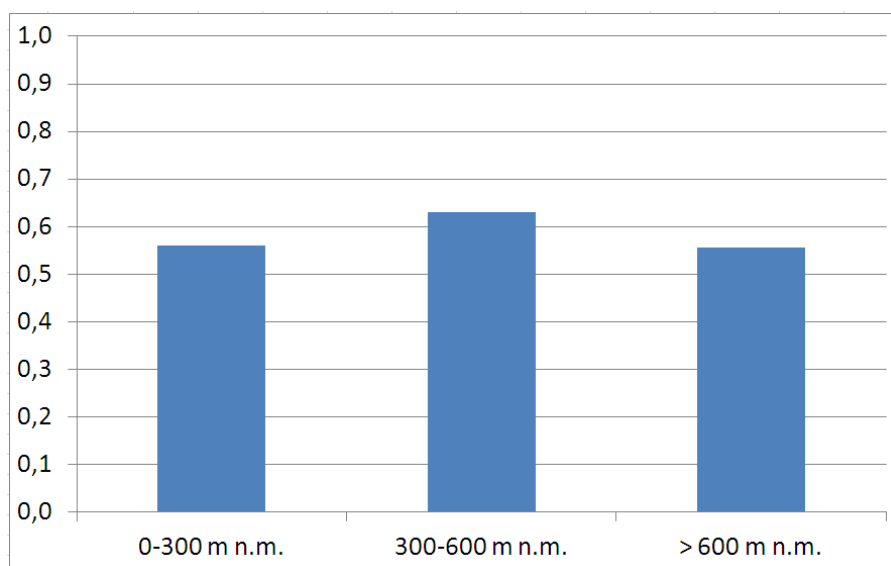


Obr. 11.17 Relativní denní chod počtu pixelů, ve kterých byly COMBI kritériem detekovány kroupy, pro čtyři měsíce v teplé části let 2007-2012.

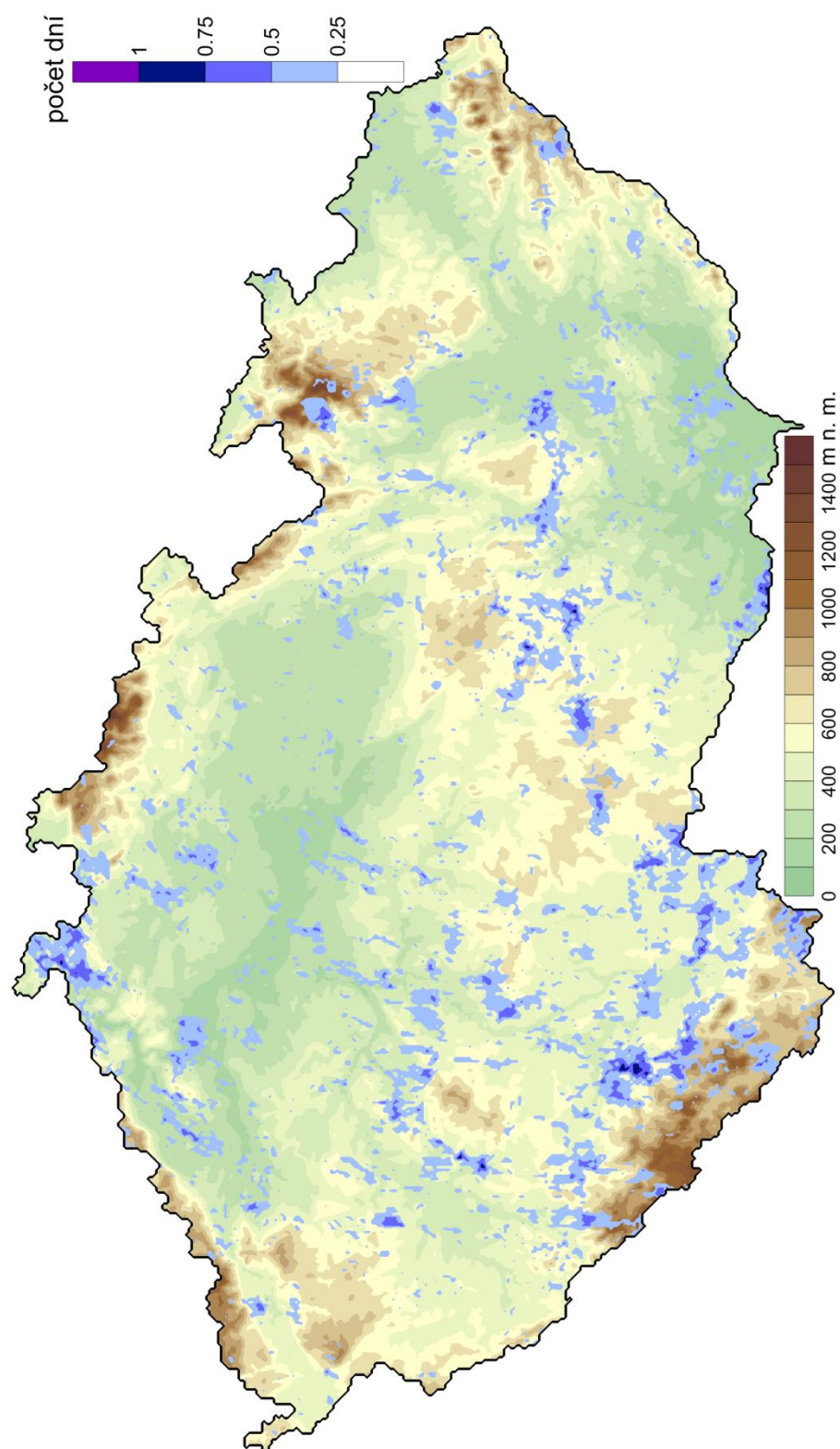
11.4 Riziko krupobití v Česku

Mapa průměrného ročního počtu kroupových dní v Česku na základě COMBI kritéria vyjadřuje plošné rozložení rizika silného krupobití v Česku (obrázek 11.18). Informace je ovšem limitována použitými daty, která jsou za šest letních období let 2007-2012. Na mapě jsou zřejmé oblasti, kde bylo silné krupobití detekováno nejčastěji. Jedná se zejména o Šluknovský výběžek, Pošumaví a pás táhnoucí se přes Českomoravskou vrchovinu. Zajímavá je otázka vztahu orografie k výskytu krupobití. V obrázku 3.1 (kap. 3.2) s průměrným ročním počtem dnů s krupobitím sestaveným na základě informací z pozemních stanic je patrný vliv nadmořské výšky. Nejvyšší hodnoty počtu kroupových dní se tu nachází v nejvyšších horských oblastech. Jedná se však o výskyt krup jakékoliv velikosti, tedy již od průměru 0,5 cm. Oblasti s nejvyšším počtem silných krupobití, s kroupami přibližně od 2 cm, se však podle obr. 11.18 vyskytují spíše v podhůří. Zabývala jsem se proto plošným rozložením výskytu silného krupobití v závislosti na nadmořské výšce.

Z grafu relativního počtu kroupových pixelů (obr. 11.19) v oblastech se zvolenou nadmořskou výškou je patrný vyšší výskyt krupobití podle COMBI kritéria ve výškách 300 až 600 m n.m. Rozdíly ve výskytu ‚kroupových‘ pixelů v různých nadmořských výškách jsou malé a potvrzují tak, že vývoj velkých krup není vázaný na lokální orografii.

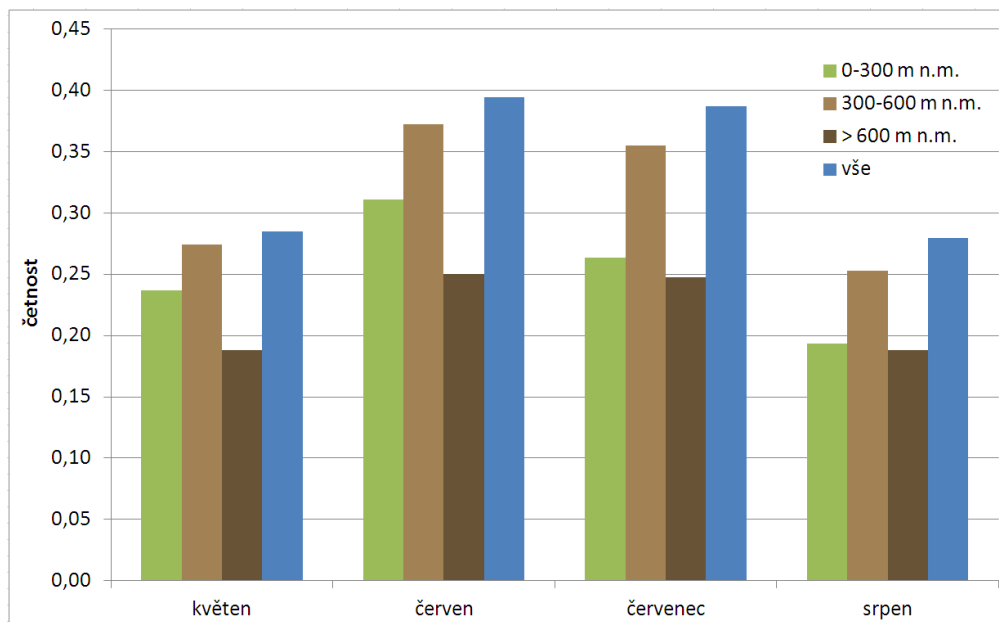


Obr. 11.19 Relativní počet pixelů, ve kterých bylo COMBI kritériem detekováno krupobití, na území Česka za květen až srpen 2007-2012.



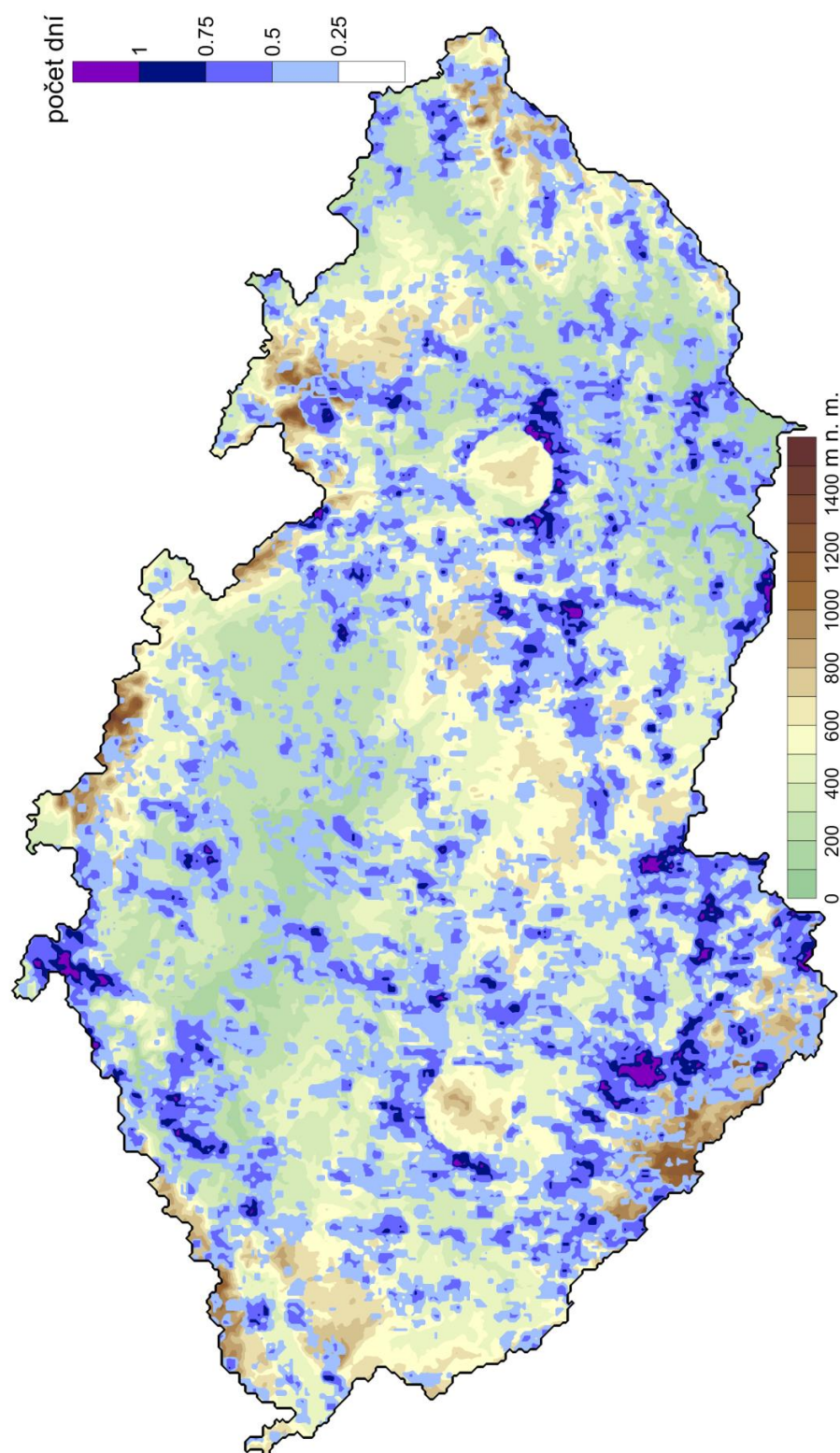
Obr. 11.18: Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití COMBI kritéria s upravenými prahovými hodnotami pro oblasti mimo dosah obou radarů. Na podkladu s nadmořskou výškou.

V grafu na obrázku 11.20 je znázorněn sezonní chod relativního počtu pixelů, ve kterých jsou COMBI kritériem detekovány kroupy, pro tři kategorie nadmořské výšky. Ve všech případech je maximum v červnu, nejvyrovnanější sezonní chod je v nejvyšších nadmořských výškách.



Obr. 11.20 Sezonní chod relativní četnosti pixelů detekujících kroupy ve třech kategoriích nadmořské výšky.

Abych zohlednila neurčitost v lokalizaci kroupových událostí detekovaných z radarových dat, vytvořila jsem mapu (obr. 11.21), ve které je platnost ‚kroupového‘ pixelu rozšířena do okolí 3x3 km. V této mapě jsou zvýrazněny oblasti s maximálním výskytem kroupových dní. Více než jeden kroupový den za rok se tu objevuje zejména v oblasti NP České Švýcarsko, v Šumavském podhůří na Prachaticku, v okolí Jindřichova Hradce a na úpatí Českomoravské Vrchoviny východně od Velkého Meziříčí.



Obr. 11.21: Průměrný roční počet dní s krupobitím na území Česka za květen až srpen 2007-2012 při použití COMBI kritéria s upravenými prahovými hodnotami pro oblast mimo dosah obou radarů a s rozšířením platnosti ,kroupových‘ pixelů na 3x3 km.

12. Závěrečné shrnutí a diskuze

Předkládaná disertační práce studuje možnosti detekce krup pomocí dat z meteorologických radarů. Výzkum a získané výsledky jsou zaměřené na území Česka, kde jsou silná krupobití pozorována v letních měsících a lokálně způsobují i velké škody. Využití optimalizovaných kritérií pro detekci krup a lepší poznání prostorového rozložení výskytu silného krupobití může přispět ke zkvalitnění diagnózy i velmi krátkodobé předpovědi krupobití.

Cílem první části výzkumné práce bylo testování metod detekce krup z radarových dat a nalezení vhodného kritéria pro detekci krup na území Česka. Pro testování byly zvoleny metody vhodné pro aplikaci s dostupnými daty a použitelné v operativním provozu. Vybrané algoritmy byly otestovány na 25 událostech s krupobitím v Česku a byly nalezeny prahové hodnoty, které vytvořily kritéria pro detekci silných krup v Česku. Vodítkem pro nalezení vhodných prahových hodnot byl požadavek podobných projevů výsledných kroupových kritérií, protože použité metody pro detekci krup v různých studiích prokázaly schopnost detekce krup a ve výsledcích se příliš nelišily. Pomocí nalezených prahových hodnot jsou detekována silná krupobití proto, že byla nalezena na základě případů s výraznými projevy. Právě krupobití, která způsobila škody na budovách, automobilech a úrodě byla nalezena v použitých informačních zdrojích.

Přestože byla práce zaměřena na detekci krup na území Česka, část testů byla provedena i na datech z Bádenska-Württemberska. Z této části Německa jsem měla k dispozici více informací o konkrétních krupobitích a bylo tak možné provést přesnější verifikaci. Výsledné prahové hodnoty přispěly k optimalizaci výsledků pro Česko. Z německého testování byla také odvozena forma pro nové kombinované COMBI kritérium. COMBI kritérium bylo vytvořeno na základě nejlépe se projevujících jednotlivých kritérií tak, aby bylo dosaženo ještě lepších výsledků při testování na 25 událostech s krupobitím v oblasti okolí Stuttgartu. Pro Česko byla zachována forma COMBI kritéria, ale na základě zkušeností s jednotlivými kritérii v obou testovaných oblastech byly změněny prahové hodnoty. Na čtyřech případových studiích silného krupobití v Česku pak byla ilustrována schopnost COMBI kritéria detekovat kroupy.

Druhá výzkumná část práce je věnována klimatologii krupobití v Česku na základě radarových kritérií. Byla použita radarová data z měsíců květen až srpen 2007-2012. Nejprve bylo porovnáno prostorové rozložení výskytu silných krup pro všechna vytvořená kritéria.

Prostorová distribuce se pro jednotlivá kritéria příliš neliší, patrné jsou rozdíly v hodnotách průměrného ročního počtu kroupových dní. Další klimatologické charakteristiky oblasti jsou vytvořeny již pouze na základě COMBI kritéria. Na většině území Česka byla zjištěna bodová četnost silného krupobití do čtvrtiny dne za rok, tedy letní krupobití s výraznými projevy je na našem území spíše výjimečnou událostí. V sezonním chodu krupobití bylo nalezeno maximum pro červen. V denním chodu se projevilo odpolední maximum mezi 14 a 18 UTC.

V závěru práce jsou uvedeny mapy ilustrující riziko krupobití v Česku na základě COMBI kritéria. Z rozložení oblastí s výskytem silných krupobití vyplývá, že taková krupobití nejsou jednoznačně závislá na nadmořské výšce. Nejvyšší hodnoty roční četnosti silného krupobití dosahují jednoho dne za rok. Rozložení oblastí s nejvyššími hodnotami ukazuje na možné ovlivnění lokální orografií. Oblasti, kde se silná krupobití vyskytují nejčastěji, často odpovídají závětrným lokalitám pro jihozápadní proudění.

Výsledky dosažené v předkládané disertační práci přispěly k poznání o distribuci silných krupobití v Česku a vytvořená kritéria pro detekci krup mohou přispět ke zlepšení operativní detekce krup. Vzhledem k technickému vývoji v oblasti meteorologických radarů je pro další výzkum v oblasti detekce krup vhodné věnovat se polarimetrickým radarům. Díky veličinám, které je možné z měření těchto radarů získat, vznikají nové možnosti pro detekci krup z radarových měření.

Vývoj krup v konvekčních oblacích je výsledkem složitých mikrofyzikálních procesů, jejichž průběh je ovlivněn dynamikou oblaku. Detekce krup je tak stále nedořešeným problémem, který je předmětem současného výzkumu. Kritérium COMBI optimalizované pro území Česka může přispět ke zlepšení operativní detekce krup. Stále je však možné dosáhnout dalšího zlepšení pomocí dokonalejších měření i dokonalejšího poznání kroupotvorného mechanismu. Zaměření na detekci krup na základě budoucího provozu polarimetrických radarů na našem území je tak další perspektivou pokračování výzkumu, jehož výsledky jsou dokumentovány v předložené disertační práci.

Literatura:

- Amburn, S.A., Wolf, P.L. (1997): VIL Density as a Hail Indicator. *Weather and Forecasting* 12, 473-478.
- Atlas podnebí Česka (2007). Praha, Olomouc: ČHMÚ, Univerzita Palackého v Olomouci. 206 s. ISBN 978-80-86690-26-1 a ISBN 978-80-244-1626-7.
- Auer Jr., A.H. (1994): Hail Recognition through the Combined Use of Radar Reflectivity and Cloud-Top Temperatures. *Monthly Weather Review* 122, 2218-2221.
- Bauer-Messmer, B., Waldvogel, A. (1997): Satellite data based detection and prediction of hail. *Atmospheric Research* 43, 217-231.
- Berdon, N.P. (2009): The analyses of thunderstorm on 4 August 2006. *Atmospheric Research* 93, 111-117.
- Berthet, C., Dessens, J., Sanchez, J.L. (2011): Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France. *Atmospheric Research* 100, 391-400.
- Brandes, E.A., Ryzhkov, A.V. (2004): Hail detection with polarimetric radar. 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace, October 2004.
[https://ams.confex.com/ams/11aram22sls/techprogram/paper_82033.htm;
11. 7. 2012]
- Cotton, W.R., Pielke, R.A. (2008): *Human Impact on Weather and Climate*. 2. vydání, Cambridge University Press, 308 s. ISBN 978-0-521-60056-9.
- Delobbe, L., Holleman, I. (2006): Uncertainties in radar echo top heights used for hail detection. *Meteorological Applications* 13, 361-374.
- Edwards, R., Thompson, R.L. (1998): Nationwide comparisons of hail size with WSR-88D vertically integrated liquid water and derived thermodynamic sounding data. *Weather and Forecasting* 13, 277-285.
- Federer, B., Waldvogel, A., Schmid, W., et al. (1986): Main Results of Grossversuch IV. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25, 917-957.
- Féral, L., Sauvageot, H., Soula, S. (2003): Hail detection using S- and C-band radar reflectivity differences. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20, 233-248.
- Geotis, S.G. (1963): Some Radar Measurements of Hailstorms. *Journal of Applied Meteorology* 2, 270-275.
- Gokhale, N.R. (1975): *Hailstorms and Hailstone Growth*. State University of New York Press, New York, 465 s.

- Greene, D.R., Clark, R.A. (1972): Vertically Integrated Liquid Water – A New Analysis Tool. *Monthly Weather Review* 100, 548-552.
- Hand, W.H., Cappelluti, G. (2011): A global hail klimatology using the UK Met Office convection diagnosis procedure (CDP) and model analyses. *Meteorological Applications* 18, 446-458.
- Hardaker, P.J., Auer Jr., A.H. (1994): The Separation of Rain and Hail using Single Polarization Radar Echoes and IR cloud-top temperatures. *Meteorological Applications* 1, 201-204.
- Heinselman, P.L., Ryzhkov, A.V. (2006): Validation of Polarimetric Hail Detection. *Weather and Forecasting* 21, 839-850.
- Hohl, R., Schiesser, H.H., Aller, D. (2002a): Hailfall: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings. *Atmospheric Research* 63, 177-207.
- Hohl, R., Schiesser, H.H., Knepper, I. (2002b): The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: an exploratory study in Switzerland. *Atmospheric Research* 61, 215-238.
- Holleman, I., Wessels, H.R.A., Onvlee, J.R.A., et al. (2000): Development of a hail-detection-product. *Physics and Chemistry of the Earth part B-Hydrology Oceans and Atmosphere* 25, 1293-1297.
- Houze, R.A.J. (1993): *Cloud Dynamics*. Academic Press, INC.
- Hydrometeorologické vyhodnocení bouřkového období v České republice od 1. do 8. července 2012 (2012). Praha: ČHMÚ. [http://www.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/Final_vyhodnoceni_bourek_cervenec_2012.pdf; 5. 12. 2012]
- Changnon, S.A. (1970): Hailstreaks. *Journal of Atmospheric Science* 27, 109-125.
- Chromá, K. (2006): Časová a prostorová analýza krupobití letního půlroku na území Moravy a Slezska v 19. a 20. století. *Disertační práce*, Masarykova Univerzita, Brno.
- Joe, P. et al. (2004): The S2K severe weather detection algorithms and their performance. *Weather and Forecasting* 19, 43-63.
- Johnson, J. T. et al. (1998): The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. *Weather and Forecasting* 13, 263-276.
- Kanak, J. et al. (2007): Case study of the 9 May 2003 windstorm in southern Slovakia. *Atmospheric Research* 83, 162-175.

- Kennedy, P.C. et al. (2001): Polarimetric Radar Observations of Hail Formation. *Journal of Applied Meteorology* 40, 1347-1366.
- Kessler E. ed. (1992): Thunderstorm morphology and dynamics. Vol.2 of thunderstorms: A social, scientific, and technological documentary. 2. vydání, University Oklahoma Press, 411 s. ISBN 0-8061-2434-2.
- Kitzmiller, D.H., McGovern, W.E., Saffle, R.F. (1995): The WSR-88D Severe Weather Potential Algorithm. *Weather and Forecasting* 10, 141-159.
- Knight, C.A., Knight, N.C. (1970): The Falling Behavior of Hailstones. *Journal of the Atmospheric Sciences* 27, 672-681.
- Knight, C.A., Knight, N.C. (2001): Hailstorms. *American Meteorological Society Monograph* No.50, Vol.28, Severe Convective Storms, 223-254, C. Doswell editor.
- Knight, C.A., Knight, N.C. (2005): Very Large Hailstones from Aurora, Nebraska. *American Meteorological Society*, 1773-1781.
- Knight, N.C. (1981): The Climatology of Hailstone Embryos. *Journal of Applied Meteorology* 20, 750-755.
- Kunz, M. (2007): The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, 327-342.
- Kunz, M., Sander, J., Kottmeier, C. (2009): Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in Southwest Germany. *International Journal of Climatology* 29, 2283-2297.
- Kunz, M., Puskeiler, M. (2010): High-resolution assessment of the hail hazard over complex terrain from radar and insurance data. *Meteorologische Zeitschrift* 19, 427-439.
- Lemon, L.R. (1998): The radar „three-body scatter spike“: An operational large hail signature. *Weather and Forecasting* 13, 327-340.
- Lenning, E., Fuelberg, H.E. (1998): An Evaluation of WSR-88D Severe Hail Algorithms along the Northeastern Gulf Coast. *Weather and Forecasting* 13, 1029-1044.
- Líšková, M. (2006): Možnosti detekcie krúp pomocou odvodených veličín z meteorologického rádiolokátora. Diplomová práca, Univerzita Komenského, Bratislava.
- Lopez, L., Sanchez, J.L. (2009): Discriminant methods for radar detection of hail. *Atmospheric Research* 93, 358-368.

- Lu, ZY, Yang, YF (2006): A study of hailstone detection system based on radar echo reflectivity image. ISDA 2006: Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications 2, 423-428.
- Makitov, V. (2007): Radar measurements of integral parameters of hailstorms used on hail suppression projects. *Atmospheric Research* 83, 380-388.
- Mallafre, M.C. et al., (2009): Improving hail identification in the Ebro Valley region using radar observations: Probability equations and warning thresholds. *Atmospheric Research* 93, 474-482.
- Marzban, C., Witt, A. (2001): A Bayesian neural network for severe hail size prediction. *Weather and Forecasting* 16, 600-610.
- Mason, B.J. (1971): *The Physics of Clouds*. Clarendon Press, Oxford, 671 s.
- Meischner, P. et al. (2004): *Weather Radar – Principles and Advanced Applications*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Meteorologický slovník (1993): *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Ministerstvo životního prostředí ČR, Academia, Praha, 594 s.
- Mikeladzová, J. (2009): *Nebezpečné hydrometeorologické jevy na území Brna a okolí*. Diplomová práce, Geografický ústav, Masarykova univerzita, Brno.
- Nelson, S.P. (1987): The hybrid multicellular-supercellular storm: An efficient hail producer. Part II: General characteristics and implication for hail growth. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44, 2060-2073.
- Novák, P. (2007): The Czech Hydrometeorological Institute's severe storm nowcasting system. *Atmospheric Research* 83, 450-457.
- Počakal, D. et al. (2009): Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography. *Atmospheric Research* 93, 516-525.
- Pruppacher, H.R., Klett, J.D. (1980): *Microphysics of clouds and precipitation*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 714 s.
- Pruppacher, H.R., Klett, J.D. (1997): *Microphysics of clouds and precipitation*. Second revised and enlarged edition with an introduction to cloud chemistry and cloud electricity. Atmospheric and oceanographic sciences library, vol.18, Kluwer Academic Publishers, 954 s.

- Púčik, T., Valachová, M., Zacharov, P. (2013): Upper tropospheric conditions in relation to the cloud top feature of 15 August 2010 convective storm. *Atmospheric Research* 123, 249-267.
- Puskeiler, M. (2009): Analyse der Hagelgefährdung durch Kombination von Radardaten und Schadendaten für Südwestdeutschland. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie.
- Putsay, M. et al. (2009): Case study of Mesoscale Convective Systems over Hungary on 29 June 2006 with satellite, radar and lightning data. *Atmospheric Research* 93, 82-92.
- Roos, D.V.D.S. (1972): A Giant Hailstone from Kansas in Free Fall. *Journal of Applied Meteorology* 11, 1008-1011.
- Řezáčová et al. (2007): Fyzika oblaků a srážek. Academia, Praha, 574 s.
- Saltikoff, E. et al. (2010): A Climatological Comparison of Radar and Ground Observations of Hail in Finland. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49, 101-114.
- San Ambrosio, I. et al. (2007): Development and behaviour of a radar-based operational tool for hailstorms identification. *Atmospheric Research* 83, 306-314.
- Schiesser, H.H. (1990): Hailfall: the relationship between radar measurements and crop damage. *Atmospheric Research* 25, 559-582.
- Schuster, S.S. et al. (2005): A hail climatology of the greater Sydney area and New South Wales, Australia. *International Journal of Climatology* 25, 1633-1650.
- Schuster, S.S., Blong, R.J., McAneney, K.J. (2006): Relationship between radar-derived hail kinetic energy and damage to insured buildings for severe hailstorms in Eastern Australia. *Atmospheric Research* 81, 215-235.
- Sioutas, M. et al. (2009): Hail frequency, distribution and intensity in Northern Greece. *Atmospheric Research* 93, 526-533.
- Skripniková, K., Řezáčová, D. (2010):** Detekce výskytu krup pomocí radarových dat. *Meteorologické Zprávy* 63, 76-82.
- Skripniková, K., Řezáčová, D. (2013a):** Hodnocení kritérií pro detekci výskytu krup využívajících radarová měření. *Meteorologické Zprávy* 66, 97-103.
- Skripniková, K., Řezáčová, D. (2013b):** Radar-based hail detection. *Atmospheric Research*, v tisku, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.06.002.

- Tabary, P. et al. (2009): Unusually High Differential Attenuation at C Band: Results from a Two-Year Analysis of the French Trappes Polarimetric Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48, 2037-2053.
- Tuovinen, J P. et al. (2009): Climatology of Severe Hail in Finland: 1930-2006. *Monthly Weather Review* 137, 2238-2249.
- Vinet, F. (2001): Climatology of hail in France. *Atmospheric Research* 56, 309-323.
- Waldvogel, A. et al. (1979): Criteria for the Detection of Hail Cells. *Journal of Applied Meteorology* 18, 1521-1525.
- Waldvogel, A. et al. (1978b): The kinetic energy of hailfalls. Part 2: Radar and hailpads. *Journal of Applied Meteorology*, vol.17, 1680-1693.
- Waldvogel, A. et al. (1978a): The kinetic energy of hailfalls. Part 1: Hailstone spectra. *Journal of Applied Meteorology* 17, 515-520.
- Webb, J.D.C. et al. (2009): Severe hailstorms in Britain and Ireland, a climatological survey and hazard assessment. *Atmospheric Research* 93, 587-606.
- Webb, J.D.C. et al. (2001): Climatology of severe hailstorms in Great Britain. *Atmospheric Research* 56, 291-308.
- Weltkarte der Naturgefahren (2009). Münchener Rück. [www.munichre.com/nathan]
- Wieringa, J., Holleman, I. (2006): If cannons cannot fight hail, what else? *Meteorologische Zeitschrift* 15, 659-669.
- Witt, A. et al. (1998): An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting* 13, 286-303.
- Witt, A., Nelson, S.P. (1991): The Use of Single-Doppler Radar for Estimating Maximum Hailstone Size. *Journal of Applied Meteorology* 30, 425-431.
- Xie, B.G. et al. (2008): Trends in Hail in China during 1960-2005. *Geophysical Research Letters* 35, Art No. L13801.
- Zhang, C.X. et al. (2008): Climatology of Hail in China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 795-804.